



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ

Διατμηματικό πρόγραμμα μεταπτυχιακών σπουδών:
ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΕΡΓΩΝ, ΣΥΓΚΟΙΝΩΝΙΑΚΟΣ ΚΑΙ ΧΩΡΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ

Εκτίμηση Επικινδυνότητας κατά την Μεταφορά Επικίνδυνων Φορτίων. Εφαρμογή στο Σιδηροδρομικό Δίκτυο.



Διπλωματική Εργασία

Ελένη Φλασκή

Βόλος, 2020

© 2020 Ελένη Κ. Φλασκή

Η έγκριση της διπλωματικής εργασίας από το Διατμηματικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών «Διαχείριση Έργων, Συγκοινωνιακός και Χωρικός Σχεδιασμός» δεν υποδηλώνει αποδοχή των απόψεων του/της συγγραφέα (Ν. 5343/32 αρ. 202 παρ. 2).

Εγκρίθηκε από τα Μέλη της Τριμελούς Εξεταστικής Επιτροπής:

Πρώτη Εξετάστρια (Επιβλέπουσα)

Δρ. Ευτυχία Ναθαναήλ

Αναπληρώτρια Καθηγήτρια,

Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Δεύτερος Εξεταστής

Δρ. Νικόλαος Ηλιού

Καθηγητής,

Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Τρίτος Εξεταστής

Δρ. Κωνσταντίνος Βογιαντζής

Καθηγητής,

Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

***Στους αγαπημένους μου
Γιάννη, Ιφιγένεια & Ιάσωνα***

Περίληψη εργασίας και λέξεις κλειδιά

Η μεταφορά των Επικίνδυνων φορτίων (Hazardous Materials ή Dangerous Goods) είναι συνυφασμένη με τον κίνδυνο εκδήλωσης ή μη, ατυχήματος και με τις επιπτώσεις που ένα πιθανό ατύχημα μπορεί να έχει στο ανθρώπινο, φυσικό και υλικό περιβάλλον. Για το λόγο αυτό οι μεταφορές HAZMAT αντιμετωπίζονται ιδιαίτερος, ως ξεχωριστό μεταφορικό πρόβλημα του οποίου καθοριστικό στάδιο αποτελεί η εκτίμηση της επικινδυνότητας του δρομολογίου που μεταφέρει τα επικίνδυνα φορτία και η αξιολόγησή της ως προς τις επιπτώσεις που ένα πιθανό ατύχημα διαρροής τους θα επιφέρει κυρίως στην υγεία και τη ζωή του ανθρώπινου πληθυσμού.

Η παρούσα διπλωματική εργασία αποτελεί ένα βήμα έρευνας και εξέτασης των πρόσφατων ερευνητικών προτάσεων της διεθνούς βιβλιογραφίας που επικεντρώνονται στην εκτίμηση της επικινδυνότητας κατά τη σιδηροδρομική, οδική και διατροπική μεταφορά (συνδυασμού οδικού & σιδηροδρομικού δικτύου) επικίνδυνων φορτίων. Αναλυτικότερα στόχος της εργασίας είναι η παρουσίαση και κατανόηση των σύγχρονων εργαλείων που έχουν αναπτυχθεί στον τομέα της εκτίμησης της επικινδυνότητας και των παραγόντων που την επηρεάζουν, στις μεθόδους στρατηγικής μείωσής της, στην αξιολόγηση εναλλακτικών διαδρομών και στην επαναδρομολόγηση του φορτίου, και γενικά στον σχεδιασμό του μεταφορικού συστήματος εντός πυκνού διατροπικού δικτύου. Επιπλέον παρουσιάζονται μέθοδοι βελτιστοποίησης του μεταφορικού μοντέλου που μεταφέρει εμπορευματικά και επικίνδυνα φορτία εννοώντας την ελαχιστοποίηση των αντικρουόμενων παραμέτρων δηλαδή της μεταφορικής επικινδυνότητας και του μεταφορικού κόστους και χρόνου παράδοσης της αποστολής. Έννοιες όπως η ίση και δίκαιη κατανομή της επικινδυνότητας, η αποστροφή στον κίνδυνο, η τρωτότητα και η μεταβλητότητα της επικινδυνότητας επίσης ενσωματώνονται στις προτεινόμενες μεθοδολογίες διαχείρισης κινδύνου.

Τέλος αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας αποτελεί η εφαρμογή της βασικής μεθοδολογίας εκτίμησης επικινδυνότητας στο πιο διαδεδομένο εμπορευματικό δρομολόγιο του Ελληνικού σιδηροδρομικού δικτύου, από τον Ε.Σ. Σταθμό Ικονίου Περάματος Αττικής προς τον Ε.Σ. Σταθμό Διαλογής Θεσσαλονίκης. Το περιγραφόμενο μοντέλο υπολογίζει την κοινωνική διακινδύνευση του εμπορευματικού δρομολογίου κάνοντας χρήση πραγματικών δεδομένων ατυχημάτων, δρομολογίων και αμαξοστοιχίας ενώ για την προσομοίωση του μοντέλου διασποράς χρησιμοποιήθηκε το ευρέως διαδεδομένο στην Βόρεια Αμερική λογισμικό ALOHA της Διεύθυνσης Προστασίας Περιβάλλοντος (U.S EPA), Επιπλέον επιλύθηκαν διαφορετικά σενάρια

ατμοσφαιρικών συνθηκών και συνθηκών ατυχήματος προκειμένου να διαπιστωθεί η επίδραση των παραμέτρων αυτών στο μέγεθος των επιπτώσεων πιθανού ατυχήματος. Τα αποτελέσματα της συνολικής έρευνας συγκεντρώνονται, αξιολογούνται, ταξινομούνται και παρουσιάζονται ως συμπεράσματα της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Λέξεις κλειδιά: Επικίνδυνα φορτία, εκτίμηση επικινδυνότητας, διαχείριση κινδύνου HAZMAT, σιδηροδρομική μεταφορά, διατροφική μεταφορά, ελληνικό σιδηροδρομικό δίκτυο, Ε.Σ.Σ Ικόνιο, Ε.Σ.Σ Διαλογή, ελληνικό εμπορευματικό δίκτυο

Abstract and key words

The transportation of hazardous materials (Hazmat or dangerous goods) is strictly associated with the possibility of an accident and the undesirable consequences of an event on people and environment due to their toxic ingredients. The problem of identifying potential risks and their consequences in HAZMAT transportation has been a great concern and largely acknowledged by the researchers, government bodies and shippers as one of the main issues in the broader field of transportation security and safety.

This thesis reviews and presents the recent research studies focused on the risk assessment of HAZMAT transportation by rail, road and intermodal (i.e. the combination of rail and road transport). More specifically the present thesis aims to identify current trends and tools developed in the field of risk assessment and to throw light on the different risk factors that influence the transportation network, on the new risk management techniques, on the proposed evaluation methods of alternative routes and rerouting solutions and generally on the design of HAZMAT intermodal transportation. Furthermore, optimization models of planning and managing intermodal and multi –commodity transportation systems in the presence of risk, cost and time ceilings are presented. Additionally, risk assessment methodologies entering new approaches like risk –averse, variability – in –risk, safety vulnerability and risk equity in routing of HAZMAT shipments, are included in the proposed studies.

Finally, a risk assessment framework based on the expected consequence approach, is used to solve a Greece based case study of railway transportation of dangerous goods. Specifically, the Societal Risk of the most widespread freight itinerary from “Ikonio” yard (near Piraeus) to “Dialogi” yard (in Thessaloniki) is calculated, taking into consideration the actual freight –train derailment data and freight-itinerary data. A number of release scenarios under a variety of atmospheric conditions were simulated in ALOHA software to gain relevant impact insights. Final conclusions and suggestions for future work are included.

Key words: Hazardous materials, dangerous goods, risk assessment, railway transportation, intermodal transportation, risk management, risk equity, Greek railway network, Greek freight network

Περιεχόμενα

Περίληψη εργασίας και λέξεις κλειδιά-----	5
Abstract and key words-----	7
Περιεχόμενα -----	8
Κατάλογος Πινάκων -----	11
Κατάλογος Εικόνων, Διαγραμμάτων & Αναφορών-----	13
1. Εισαγωγή-----	15
2. Νομοθετικό Πλαίσιο για Μεταφορές Επικίνδυνων Φορτίων -----	25
2.1 Διεθνείς κανονισμοί για την μεταφορά των επικίνδυνων φορτίων-----	25
2.2 Πρόσθετες Ευρωπαϊκές Οδηγίες & Ελληνική Νομοθεσία -----	29
3. Γενικό Πλαίσιο Μελέτης Εκτίμησης Επικινδυνότητας κατά την Μεταφορά Επικίνδυνων Φορτίων. -----	31
3.1. Ορισμός και μεγέθη μέτρησης επικινδυνότητας -----	33
3.2. Γενικά για την μελέτη εκτίμησης επικινδυνότητας μεταφοράς επικίνδυνων φορτίων-----	35
3.3. Φαινομένα διαρροής επικίνδυνου υλικού & σενάρια ατυχημάτων -----	37
3.3.1 Φαινομένα διαρροής επικίνδυνου υλικού -----	37
3.3.2 Αντιπροσωπευτικά Σενάρια ατυχημάτων κατά PIARC-----	40
3.4. Οριακές τιμές οξείας έκθεσης σε χημικές ουσίες-----	40
3.5. Λογισμικά προσομοίωσης και υπολογισμού επιπτώσεων ατυχημάτων από διαρροή επικίνδυνης ουσίας -----	45
3.5.1. Λογισμικό ADAM (Accident Damage Analysis Module) -----	45
3.5.2. Λογισμικό ALOHA (Areal Locations of Hazardous Atmospheres)---	47
4. Μεθοδολογίες Εκτίμησης Επικινδυνότητας στις Σιδηροδρομικές, Οδικές και Πολυτροπικές Μεταφορές HAZMAT-----	48
4.1 Κεντρική μεθοδολογία εκτίμησης επικινδυνότητας κατά την σιδηροδρομική μεταφορά επικίνδυνων φορτίων. -----	49
4.1.1 Ανάλυση ιστορικών στοιχείων σιδηροδρομικών ατυχημάτων -----	49
4.1.2 Εκτίμηση πιθανότητας ατυχήματος με εμπλοκή οχήματος που μεταφέρει επικίνδυνα φορτία και διαρροής ΕΦ -----	51
4.1.3 Εκτίμηση και ποσοτικοποίηση επιπτώσεων ατυχήματος-----	55

4.1.4	Εκτίμηση επικινδυνότητας μέσω υπολογισμού της αναμενόμενης επίπτωσης ατυχήματος.	61
4.2	Μεθοδολογίες διαχείρισης επικινδυνότητας (Risk Management)	61
4.2.1.	Μείωση επικινδυνότητας μέσω βελτίωσης ασφάλειας σιδηροδρομικής επιδομής	62
4.2.2.	Μείωση επικινδυνότητας μέσω βέλτιστης σύνθεσης της αμαξοστοιχίας	64
4.2.3.	Μείωση επικινδυνότητας μέσω σχεδιασμού και δρομολόγησης του σιδηροδρομικού συστήματος μεταφοράς Ε.Φ	64
4.3.	Μεθοδολογίες εκτίμησης επικινδυνότητας με στόχο την ίση και δίκαιη κατανομή κινδύνου κατά την μεταφορά επικίνδυνων φορτίων (Equity Risk)	72
4.3.1.	Εκτίμηση επικινδυνότητας μεταφοράς HAZMAT μέσω του υπολογισμού της Αξίας-Σε- Κίνδυνο (Value –at-risk)	74
4.3.2.	Εκτίμηση Επικινδυνότητας με τη χρήση του μεγέθους Δεσμευμένη Αξία –σε- Κίνδυνο (Conditional Value at Risk σε συντομία CVaR)	78
4.4.	Συμπεράσματα σχετικά με τις μεθοδολογίες εκτίμησης επικινδυνότητας σιδηροδρομικής μεταφοράς επικίνδυνων φορτίων	80
4.5.	Οδική μεταφορά επικίνδυνων φορτίων	82
4.5.1	Ανάλυση ιστορικών δεδομένων ατυχημάτων	82
4.5.2	Εκτίμηση πιθανότητας ατυχήματος με εμπλοκή οχήματος που μεταφέρει επικίνδυνα φορτία και διαρροής ΕΦ	83
4.5.3	Εκτίμηση και ποσοτικοποίηση επιπτώσεων ατυχήματος	86
4.5.4	Εκτίμηση επικινδυνότητας μέσω υπολογισμού της αναμενόμενης επίπτωσης ατυχήματος.	99
4.5.5	Συμπεράσματα σχετικά με την κεντρική μεθοδολογία εκτίμησης οδικής μεταφορικής επικινδυνότητας ΕΦ.	102
4.6.	Πολυτροπική μεταφορά επικίνδυνων φορτίων	103
4.6.1	Διαφορές μεταξύ οδικής/σιδηροδρομικής μεταφοράς ΕΦ και διατροπικής μεταφοράς ΕΦ.	104
4.6.2	Σύντομη βιβλιογραφική ανασκόπηση προτάσεων εκτίμησης επικινδυνότητας σε διατροπικό μεταφορικό σύστημα.	104
4.6.3	Πρόσφατες έρευνες εκτίμησης επικινδυνότητας σε διατροπικό μεταφορικό σύστημα.	105

4.6.4	Συμπεράσματα για τι μεθοδολογίες εκτίμησης επικινδυνότητας των συνδυασμένων μεταφορών. -----	110
5.	Μελέτη περίπτωσης στον Ελληνικό σιδηροδρομικό άξονα -----	112
5.1	Περιγραφή και Παραδοχές Μελέτη περίπτωσης-----	113
5.1.1.	Παραδοχές εργασίας της περίπτωσης μελέτης-----	113
5.1.2.	Παραδοχές του μοντέλου υπολογισμού Επικινδυνότητας HAZMAT: 116	
5.2	Δεδομένα μελέτης περίπτωσης -----	122
5.2.1.	Δεδομένα από ΤΡΑΙΝΟΣΕ -----	122
5.2.2.	Δεδομένα από πλατφόρμα GEODATA -----	125
5.2.3.	Δεδομένα από Ελληνική Στατιστική Υπηρεσία -----	125
5.3	Επίλυση Προβλήματος -----	126
5.3.1.	Υπολογισμός επί μέρους παραμέτρων-----	126
5.3.2.	Υπολογισμός απειλούμενης περιοχής μέσω ALOHA -----	138
5.3.3.	Καθορισμός ζώνης επιρροής ατυχήματος κατά μήκος δρομολογίου 141	
5.3.4.	Υπολογισμός εκτεθειμένου πληθυσμού -----	146
5.3.5.	Υπολογισμός επίπτωσης ατυχήματος-----	153
5.4	Αποτελέσματα επίλυσης -----	154
6.	Συμπεράσματα & προτάσεις περαιτέρω έρευνας -----	159
6.1	Συμπεράσματα μεθοδολογιών εκτίμησης επικινδυνότητας-----	159
6.2	Συμπεράσματα από την εφαρμογή μεθοδολογίας εκτίμησης επικινδυνότητας στο ελληνικό σιδηροδρομικό δίκτυο. -----	163
7.	Βιβλιογραφία-----	166

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1.1: Ετήσια Οδική μεταφορά επικίνδυνων φορτίων στην Ευρωπαϊκή Ένωση (πηγή: (Eurostat, 2019), ίδια επεξεργασία) -----	16
Πίνακας 1.2: Ετήσια σιδηροδρομική μεταφορά επικίνδυνων φορτίων στην Ευρωπαϊκή Ένωση (πηγή: (Eurostat, 2019))-----	17
Πίνακας 1.3: Απόσπασμα της Καταγραφής Ροής Εμπορευμάτων 2017 των ΗΠΑ (πηγή: (US Census Bureau, 2018) -----	18
Πίνακας 1.4: Ετήσιος αριθμός ατυχημάτων εμπλεκόμενων με την μεταφορά επικίνδυνων ουσιών 2004-2015 (πηγή: (Eurostat, 2019) -----	21
Πίνακας 3.1: Τελικά σενάρια ατυχημάτων οχημάτων μεταφοράς επικινδύνων φορτίων (πηγή (Lacroix, et al., 1999)-----	40
Πίνακας 4.1: Αριθμός εκτροχιασμών ($\times 10^{-6}$) ανά εκατομμύρια διανυθέντα διεθνή μίλια (πηγή: table 2 από (Verma, 2011), FRA website)-----	53
Πίνακας 4.2: Προσομοίωση σεναρίων διαρροής χλωρίου με ALOHA (Πηγή: (Verma, 2011)-----	59
Πίνακας 4.3: Πιθανότητες εμφάνισης τελικών σεναρίων δεδομένης της εμφάνισης οδικού ατυχήματος (πηγή: (Nathanail, et al., 2010))-----	85
Πίνακας 5.1: Προσομοιώσεις διαρροής χλωρίου από οπή διαφορετικών διαμέτρων, με χρήση ALOHA -----	115
Πίνακας 5.2: Τυπολόγιο μεθοδολογίας(πηγή: (Verma, 2011), ίδια επεξεργασία) -----	116
Πίνακας 5.3: Σύμβολα εξισώσεων μεθοδολογίας -----	117
Πίνακας 5.4: Τιμές εξαρτημένων πιθανοτήτων στο πεδίο για μικρό τραίνο (πηγή: (Verma, 2011)-----	119
Πίνακας 5.5: Κατηγορίες ατμοσφαιρικής αστάθειας (πηγή: ALOHA)-----	120
Πίνακας 5.6: Οριακές τιμές έκθεσης σε χλώριο στην Ελλάδα και στις ΗΠΑ ---	122
Πίνακας 5.7: Ετήσια δρομολόγια 2015-2019(πηγή: ΤΡΑΙΝΟΣΕ,2020)-----	123
Πίνακας 5.8: Εκτροχιασμοί πεδίου περιόδου 2015-2019 (Πηγή: ΤΡΑΙΝΟΣΕ, 2020) -----	123
Πίνακας 5.9: Δεδομένα HAZMAT έτους 2019 (Πηγή: ΤΡΑΙΝΟΣΕ, 2020)-----	124

Πίνακας 5.10: Υπολογισμένη πυκνότητα πληθυσμού ανά περιφερειακή ενότητα (πηγή: (ΕΛΣΤΑΤ, 2011) -----	126
Πίνακας 5.11: Υπολογισμός διανυθέντων χιλιομέτρων 2015-2019-----	127
Πίνακας 5.12: Υπολογισμός δείκτη ατυχημάτων πεδίου 2015-2019 -----	127
Πίνακας 5.13: Υπολογισμός πιθανότητας P(A) δρομολογίου της ΕΑ _Τ -----	127
Πίνακας 5.14: Αποτελέσματα 1 ^{ης} Αναφοράς ΑΛΟΗΑ (όμοιος με 5.1) -----	128
Πίνακας 5.15: Αποτελέσματα 2 ^{ης} Αναφοράς ΑΛΟΗΑ-----	132
Πίνακας 5.16: Αποτελέσματα 3 ^{ης} Αναφοράς ΑΛΟΗΑ-----	135
Πίνακας 5.17: Αποτελέσματα 4 ^{ης} Αναφοράς ΑΛΟΗΑ-----	135
Πίνακας 5.18: Υπολογισμός εκτεθειμένου πληθυσμού στο 2 ^ο σενάριο πρωινού δρομολογίου -----	151
Πίνακας 5.19: Υπολογισμός εκτεθειμένου πληθυσμού στο 1 ^ο σενάριο νυχτερινού δρομολογίου -----	152
Πίνακας 5.20: Υπολογισμός επιπτώσεων για νυχτερινό και πρωινό δρομολόγιο -----	153
Πίνακας 5.21: Αποτελέσματα Επικινδυνότητας, υπολογισμός Κοινωνικής Διακινδύνευσης-----	154
Πίνακας 5.22: Κοινωνική διακινδύνευση ανά ΠΕ/ΔΕ , νυχτερινό δρομολόγιο -	155
Πίνακας 5.23: Κοινωνική διακινδύνευση ανά ΠΕ/ΔΕ , πρωινό δρομολόγιο ----	157

Κατάλογος Εικόνων, Διαγραμμάτων & Αναφορών

Εικόνα 1: Προτεινόμενα μέτρα οδικών υποδομών ΕΣΣΜ (πηγή: ΕΣΣΜ 2037-ΥΠΥΜΕ)-----	19
Εικόνα 2: Προτεινόμενα μέτρα σιδηροδρ. υποδομών ΕΣΣΜ (πηγή: ΕΣΣΜ 2037-ΥΠΥΜΕ)-----	20
Εικόνα 3: Σενάρια επιπτώσεων (πηγή: -----	39
Εικόνα 4: Απεικόνιση διασποράς αεροσωματιδίων κατά το μοντέλο Γκαουσσισιανής διασποράς (πηγή: (wikipedia.org, 2020))-----	57
Εικόνα 5 : Ζώνη επιρροής ατυχήματος κατά μήκος τμήματος ℓ -----	60
Διάγραμμα 1: Αθροιστική συχνότητα F για N ή περισσότερους θανάτους σύμφωνα με την Αγγλική και Ολλανδική Νομοθεσία.(πηγή (Nathanail, et al., 2010) ----	101
Διάγραμμα 2: Αθροιστική συχνότητα F για N ή περισσότερους θανάτους σύμφωνα με την Νορβηγική Νομοθεσία(πηγή (Nathanail, et al., 2010)-----	102
1 ^η Αναφορά ALOHA: Προσομοιώσεις διαρροής βυτίου χλωρίου για διαφορετικές διαμέτρους οπής, τάξη αστάθειας D. -----	129
2 ^η Αναφορά ALOHA: Προσομοιώσεις διαρροής χλωρίου 90tn από ρωγμή 5in, υπό διαφορετική ατμοσφαιρική αστάθεια -----	132
3 ^η Αναφορά ALOHA: Προσομοιώσεις διαρροής χλωρίου 90tn υπό διαφορετικές ταχύτητες ανέμου, νυχτερινό δρομολόγιο: -----	134
4 ^η Αναφορά ALOHA: Προσομοιώσεις διαρροής χλωρίου 90tn υπό διαφορετικές ταχύτητες ανέμου, πρωινό δρομολόγιο -----	136
Εικόνα 6: Απειλούμενη Ζώνη για 1 ^ο σενάριο (επίλυση ALOHA)-----	138
5 ^η Αναφορά ALOHA: Αποτελέσματα για EA _T 180tn χλωρίου σε D ατμοσφαιρική αστάθεια, νυχτερινό δρομολόγιο. -----	139
6 ^η Αναφορά ALOHA: Αποτελέσματα για EA _T 180tn χλωρίου σε C ατμοσφαιρική αστάθεια, πρωινό δρομολόγιο -----	140
Εικόνα 7: Απειλούμενη ζώνη για 2 ^ο σενάριο (επίλυση ALOHA) -----	141
Εικόνα8: Απεικόνιση ζωνών επιρροής περίπτωσης μελέτης στο Expert GPS --	142
Εικόνα 9: Ζώνες επιρροής περιφερειακή ενότητα Θεσσαλονίκης-----	143
Εικόνα 10: Ζώνες επιρροής περιφερειακή ενότητα Ημαθίας -----	143

Εικόνα 11: Ζώνες επιρροής περιφερειακής ενότητας Πιερίας -----	144
Εικόνα 12: Ζώνες επιρροής περιφερειακής ενότητας Λάρισας -----	144
Εικόνα 13: Ζώνες επιρροής περιφερειακής ενότητας Φθιώτιδας -----	145
Εικόνα 14: Ζώνες επιρροής περιφερειακής ενότητας Βοιωτίας -----	145
Εικόνα 15: Ζώνες επιρροής Αττικής-----	146
Εικόνα16: Εμβαδοποίηση ζωνών επιρροής στις ΠΕ Θεσσαλονίκης & Ημαθίας, για Χ ₂ -----	148
Εικόνα17: Εμβαδοποίηση ζώνης επιρροής ΠΕ Πιερίας, Λάρισας για Χ ₂ -----	148
Εικόνα18: Εμβαδοποίηση ζώνης επιρροής ΠΕ Φθιώτιδας για Χ ₂ -----	149
Εικόνα19: Εμβαδοποίηση ζώνης επιρροής ΠΕ Βοιωτία για Χ ₂ -----	150
Εικόνα 20: Εμβαδοποίηση ζώνης επιρροής νομού Αττικής για Χ ₂ -----	150
Εικόνα 21: Γραφική αποτύπωση ΡΕ, SR ανά Περιφερειακή /Δημοτική Ενότητα, νυχτερινό δρομολόγιο-----	156
Εικόνα 22 Γραφική αποτύπωση ΡΕ, SR ανά Περιφερειακή /Δημοτική Ενότητα, πρωινό δρομολόγιο -----	158

1. Εισαγωγή

Τις τελευταίες δεκαετίες η δυναμική της παγκόσμιας βιομηχανοποίησης, η οποία συσχετίζεται με αυξανόμενους ρυθμούς βιομηχανικής παραγωγής, αναπτύσσεται ιλιγγιωδώς, οδηγώντας παράλληλα στην αυξανόμενη ανάγκη για μεταφορά προϊόντων είτε με την μορφή πρώτων υλών είτε με την μορφή εμπορευμάτων.

Στα πλαίσια της αυξανόμενης ζήτησης για την μεταφορά προϊόντων εντάσσεται και η αυξανόμενη μεταφορά επικίνδυνων εμπορευμάτων (Hazardous Materials και σε συντομία «HAZMAT») μέσω του οδικού ή του σιδηροδρομικού δικτύου, ή μέσω θαλάσσιων οδών ή αεροπορικώς είτε συνδυάζοντας τα παραπάνω μέσα μεταφοράς (πολυτροπικότητα μεταφορών), είτε τέλος μέσω υπόγειων ή υποθαλάσσιων αγωγών.

Ως επικίνδυνο φορτίο (σε συντομία «ΕΦ» ή «HAZMAT»), σύμφωνα με την Υπηρεσία Ασφάλειας και Υγείας Εργαζομένων των ΗΠΑ (U.S. Occupational Safety and Health Administration- OSHA) εννοείται οποιαδήποτε ουσία ή χημικό που αποτελεί *κίνδυνο για την υγεία* ή *φυσικό κίνδυνο*, συμπεριλαμβανομένων: χημικών ουσιών που είναι καρκινογόνες, τοξικές, ερεθιστικές, διαβρωτικές, παράγοντες που δρουν στο αιμοποιητικό σύστημα, παράγοντες που βλάπτουν τους πνεύμονες, το δέρμα, τα μάτια ή τις βλεννογόνους μεμβράνες, χημικά που είναι εύφλεκτα, εκρηκτικά, οξειδωτικά, πυροφορικά, ασταθή αντιδραστικά ή αντιδρούν με το νερό και χημικές ουσίες οι οποίες κατά τη διάρκεια του συνήθους χειρισμού, χρήσης ή αποθήκευσης μπορούν να παράγουν ή να απελευθερώνουν σκόνη, αέρια, αναθυμιάσεις, ατμούς, νέφος αερίων ή καπνό που μπορεί να έχουν οποιοδήποτε από τα προαναφερθέντα χαρακτηριστικά. Η Υπηρεσία Προστασίας Περιβάλλοντος των ΗΠΑ (U.S. Environmental Protection Agency -EPA) στον παραπάνω ορισμό προσθέτει οποιοδήποτε στοιχείο ή χημικό προϊόν που μπορεί να προκαλέσει βλάβη σε ανθρώπους, φυτά ή ζώα όταν απελευθερώνεται με διαρροή, διαφυγή, άντληση, έκχυση, εκτόξευση, εκκένωση, εκφόρτωση ή μεταφόρτωση στο περιβάλλον. Οι σχετικές Ευρωπαϊκές οδηγίες για την μεταφορά των επικίνδυνων φορτίων, περιλαμβάνουν κατάλογο τουλάχιστον 3500 επικίνδυνων ουσιών δηλαδή εκρηκτικών, αερίων, εύφλεκτων υγρών και στερεών, αυτό-δραστικές, πολυμεριστικές αυτό-αναφλεγόμενες ουσίες ή ουσίες οι οποίες σε επαφή με νερό εκπέμπουν εύφλεκτα αέρια, οξειδωτικές ουσίες, οργανικά υπεροξείδια, τοξικές ουσίες, μολυσματικές ουσίες, ραδιενεργή ύλη, διαβρωτικές ουσίες κ.α.

Σχετικά με την μεταφορά των επικίνδυνων ουσιών, ενδεικτικά αναφέρεται ότι σύμφωνα με τα στοιχεία της Eurostat στην Ευρωπαϊκή Ένωση των 28 χωρών το 2018 μετακινήθηκαν οδικώς 57,2 δισεκατομμύρια τονοχιλιόμετρα επικίνδυνα φορτία. (πηγή: (Eurostat, 2019) Πρωταγωνίστριες χώρες στην οδική μεταφορά επικίνδυνων φορτίων είναι η Γερμανία, η Γαλλία, η Ιταλία, η Ισπανία και η Πολωνία ενώ η μεταφορά εύφλεκτων υγρών αποτελεί το 73% των συνολικών οδικών μετακινήσεων επικίνδυνων φορτίων τουλάχιστον από το 2009 και έως σήμερα. Πίνακας 1.1

Πίνακας 1.1: Ετήσια Οδική μεταφορά επικίνδυνων φορτίων στην Ευρωπαϊκή Ένωση
(πηγή: (Eurostat, 2019), ίδια επεξεργασία)

GEO/TIME	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
European Union - 28 countries										
Εκρηκτικά	380	619	647	492	478	649	555	691	458	679
Αέρια συμπιεσμένα, υγροποιημένα, αραωμένα, υπό πίεση	0	0	0	10.005	0	10.235	0	10.589	10.660	11.181
Ευφλεκτα υγρά	45.233	46.252	47.048	45.963	40.558	41.489	44.083	43.800	44.050	41.925
Ευφλεκτα στερεά	1.652	1.094	1.005	1.592	1.454	2.258	2.289	2.127	2.284	1.851
Αυτοεμφλεγόμενες ουσίες	1.662	1.499	1.888	1.653	1.497	1.603	1.754	1.514	0	1.583
Σύνολο	48.927	49.464	50.588	59.705	43.987	56.234	48.681	58.721	57.452	57.219
ποσοστό εύφλεκτων υγρών	92%	94%	93%	77%	92%	74%	91%	75%	77%	73%
Source of data	Eurostat						Last update		04.10.19	
UNIT	Million tonne-kilometre (TKM)						Extracted on		15.10.19	

Σε ότι αφορά στην μεταφορά επικίνδυνων φορτίων μέσω του σιδηροδρομικού δικτύου, σύμφωνα με τα διαθέσιμα στοιχεία της Eurostat, προκύπτει ότι η Πολωνία κατέχει την πρώτη θέση μεταφέροντας το έτος 2018 ποσότητα 27.029 χιλιάδων τόνων επικίνδυνων φορτίων ενώ ακολουθεί η Γαλλία με ποσότητα 16.281 χιλιάδων τόνων, η Λετονία και η Λιθουανία με 12.659 και 12.230 χιλιάδες τόνους αντίστοιχα. Στο σιδηροδρομικό δίκτυο της Ελλάδας μεταφέρθηκαν εντός του 2018, 184 χιλιάδες τόνοι όλων των τύπων επικίνδυνων φορτίων. Πίνακας 1.2

Πίνακας 1.2: Ετήσια σιδηροδρομική μεταφορά επικίνδυνων φορτίων στην Ευρωπαϊκή Ένωση (πηγή: (Eurostat, 2019))

GEO/TIME	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
European Union - 28 countries	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:
European Union - 27 countries (2007-2013)	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:
Belgium	4.178	4.461	4.383	:	:	:	:	:	:	:
Bulgaria	6.906	7.097	7.237	6.328	6.392	6.301	2.275	2.441	4.159	3.955
Czechia	5.825	6.532	7.204	6.537	8.084	8.830	11.433	9.735	9.343	9.923
Denmark	341	362	381	290	302	370	386	333	343	391
Germany	61.020	63.156	65.677	57.955	28.760	66.178	74.507	57.500	70.857	:
Estonia	26.720	23.077	23.648	19.841	18.571	9.947	6.812	7.575	6.981	9.170
Ireland	48	75	93	90	97	99	98	104	111	96
Greece	329	306	275	159	160	200	150	154	213	184
Spain	2.266	2.328	2.320	1.639	1.663	3.862	3.243	2.251	3.821	6.301
France	14.368	12.746	12.545	11.353	13.950	12.660	15.929	15.502	17.087	16.281
Croatia	1.746	1.775	1.569	1.482	1.636	1.625	1.667	1.283	1.861	1.787
Italy	7.214	:	7.106	:	:	:	:	:	:	:
Cyprus	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:
Latvia	18.781	16.867	21.522	23.657	23.985	24.011	27.357	20.785	13.959	12.659
Lithuania	13.987	13.389	12.311	13.634	13.021	11.571	12.987	12.683	13.564	12.230
Luxembourg	:	:	:	618	584	0	:	:	:	:
Hungary	6.470	6.529	6.887	6.590	8.882	9.055	8.501	9.446	8.354	:
Malta	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:
Netherlands	2.685	:	:	2.855	2.815	2.770	3.764	3.946	3.437	3.182
Austria	7.251	9.015	9.817	10.648	9.824	10.292	10.760	9.874	10.013	9.578
Poland	15.267	17.791	20.255	20.136	19.941	19.204	20.928	22.743	24.482	27.029
Portugal	347	558	1.720	2.109	1.601	1.711	1.930	1.963	2.177	1.605
Romania	15.751	15.682	15.684	16.485	16.076	17.106	16.935	16.502	16.386	9.116
Slovenia	1.956	1.985	1.905	1.904	2.006	1.974	1.882	1.738	1.884	1.819
Slovakia	3.869	3.332	3.448	2.884	4.370	4.247	4.460	4.520	4.523	4.438
Finland	5.651	6.563	5.233	5.139	5.142	5.135	4.914	5.300	4.993	4.799
Sweden	2.464	2.713	3.215	3.233	3.209	3.275	3.384	3.550	3.590	3.782
United Kingdom	5.630	4.179	5.319	4.257	5.415	5.178	4.145	3.857	3.299	4.648
Norway	549	491	560	106	108	176	197	194	209	218
Switzerland	12.445	12.030	12.180	11.198	11.601	10.564	11.880	11.155	11.976	10.776
Montenegro	:	:	:	:	:	:	:	:	3	149
North Macedonia	:	:	0	279	252	331	278	33	91	:
Turkey	3	1	12	11	8	9	6	8	2.133	2.074

Source of data

Eurostat

Last update

09.10.19

UNIT

Thousand tonnes

Extracted on

16.10.19

Αντίστοιχα σύμφωνα με τα στοιχεία του Υπουργείου Μεταφορών των ΗΠΑ, από την Καταγραφή της Ροής Εμπορευμάτων του 2017 (US Census Bureau, 2018) της οποίας τα προσωρινά στοιχεία έχουν δημοσιοποιηθεί έως και σήμερα- το 2017 μετακινήθηκαν στις ΗΠΑ 3,73 δισεκατομμύρια τόνοι επικίνδυνων φορτίων με όλους τους τρόπους μεταφοράς, καταγράφοντας αύξηση ποσότητας 48% από το 2012 όπου είχε διεξαχθεί η προηγούμενη καταγραφή. Επιπλέον το ποσοστό των επικίνδυνων φορτίων που μεταφέρθηκαν αποτελεί το 30% των συνολικών φορτίων που μετακινούνται.(Πίνακας 1.3)

Πίνακας 1.3: Απόσπασμα της Καταγραφής Ροής Εμπορευμάτων 2017 των ΗΠΑ (πηγή:
(US Census Bureau, 2018)

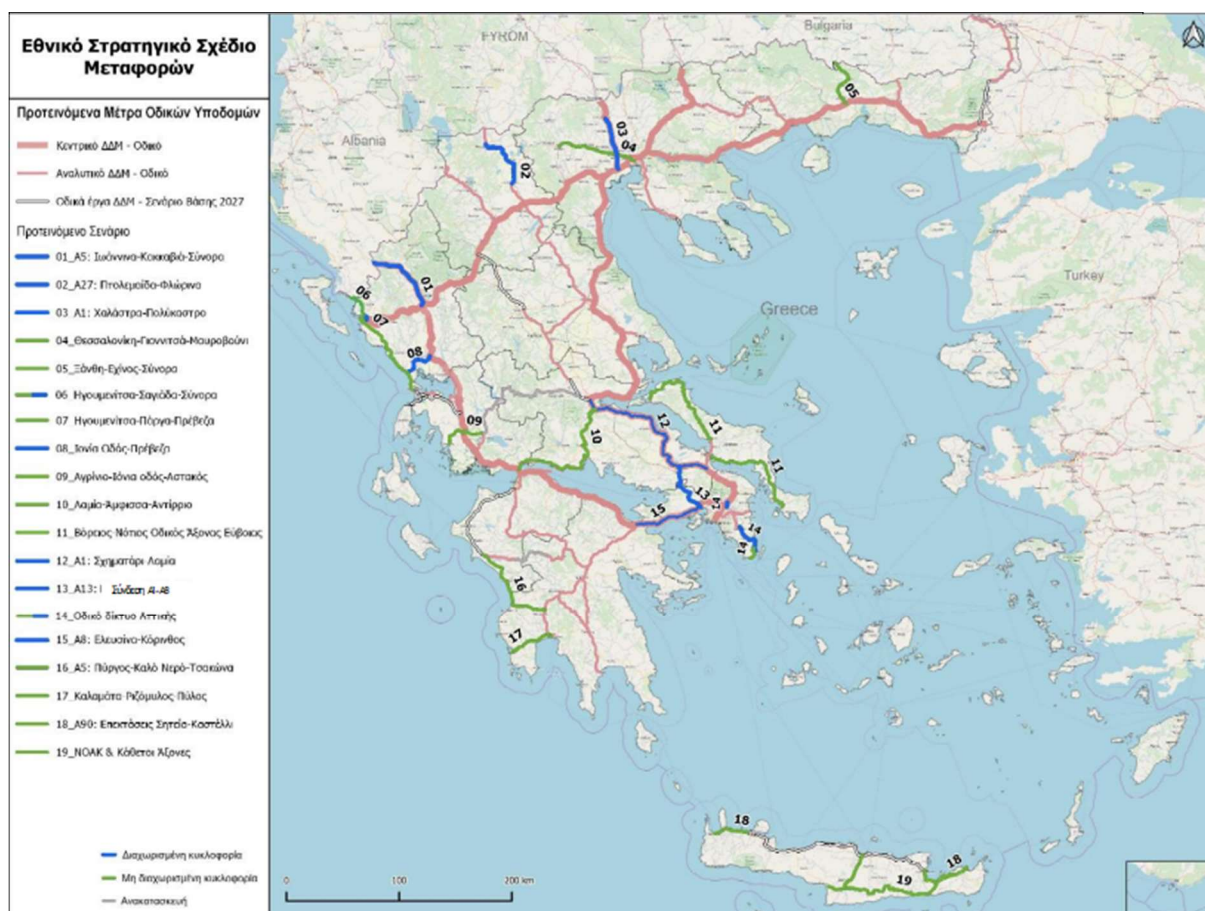
Meaning of 2012 NAICS code	2012 NAICS code	Year	Value (\$ Millions)	Tons (Thousands)	Ton-Miles (Millions)
United States					
Total for all sectors	00	2017	14.366.611	12.478.849	3.130.697
Petroleum and coal products manufacturing	324	2017	504.881	1.231.096	164.355
Chemical manufacturing	325	2017	765.155	777.165	369.240
Chemical and allied products merchant wholesalers	4246	2017	152.013	137.405	28.421
Petroleum and petroleum products merchant wholesalers	4247	2017	854.373	1.548.485	58.398
Fuel dealers	45431	2017	24.584	38.654	776
Total HAZMAT				3.732.805	621.190

Η ποσότητα των επικίνδυνων φορτίων που μεταφέρονται παρότι ήδη κατέχει υψηλά επίπεδα παγκοσμίως, αναμένεται να αυξηθεί τις επόμενες δεκαετίες. Ιδιαίτερα σημαντικός παράγοντας που διευκολύνει την εξέλιξη των μεταφορών είναι η συνεχής ανάπτυξη των πολυτροπικών συστημάτων μεταφοράς αγαθών που συμπεριλαμβάνουν την χρήση σιδηροδρομικών και οδικών δικτύων από και προς κεντρικούς εμπορικούς λιμένες. Οι συνδυασμένες μεταφορές επιτρέπουν την μεταφορά των επικίνδυνων φορτίων σε μεγαλύτερες αποστάσεις και εντός του απαιτούμενου χρόνου παράδοσης.

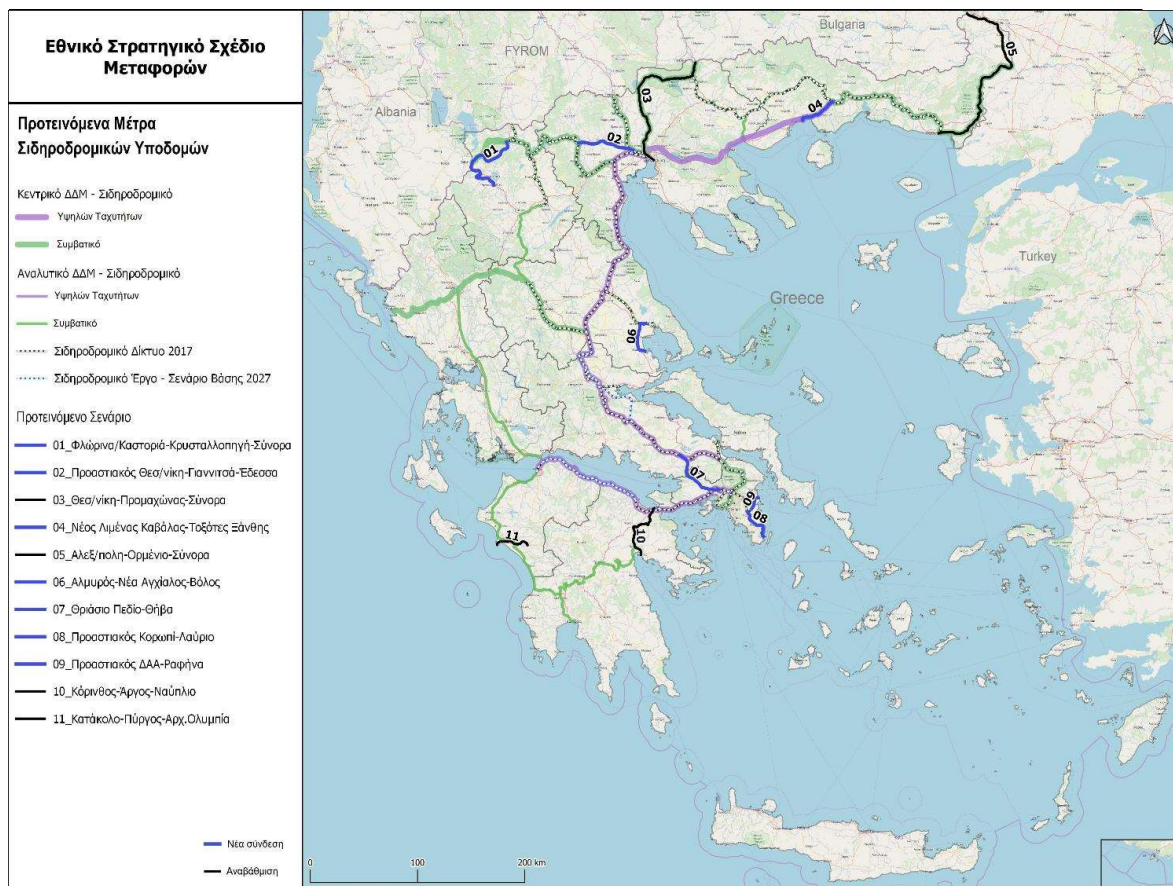
Στην χώρα μας, σύμφωνα με το εθνικό στρατηγικό σχέδιο μεταφορών 2027-2037(ΕΣΣΜ 2027-2037) του υπουργείου υποδομών και μεταφορών μεταξύ των στρατηγικών στόχων του σχεδίου είναι η ενίσχυση της περιφερειακής και διεθνούς συνδεσιμότητας μεταφορών καθώς και η διασφάλιση της ασφάλειας και της προστασίας των μεταφορών. Στις Εικόνα 1, Εικόνα 2 παρουσιάζονται αντίστοιχα το προτεινόμενο οδικό και σιδηροδρομικό δίκτυο του εθνικού στρατηγικού σχεδίου μεταφορών 2027-2037. Πυλώνες του σχεδίου συνιστούν η βελτίωση της αποδοτικότητας και της πολυτροπικότητας του άξονα ΠΑΘΕ και η ενίσχυση της διεθνούς χερσαίας συνδεσιμότητας για την ενίσχυση των εμπορικών διαδρόμων και η βελτίωση της αποδοτικότητας του τομέα της εφοδιαστικής αλυσίδας. Ιδιαίτερα σε ότι αφορά τις σιδηροδρομικές εμπορευματικές μεταφορές, αναμένεται στην πλήρη εφαρμογή του σεναρίου, το έτος 2037, αύξηση του σιδηροδρομικού εμπορευματικού έργου κατά 35% (σε τονοχιλιόμετρα), σύνδεση με Βουλγαρία (μέσω Προμαχώνα και Ορμενίου) και με Βόρεια Μακεδονία (μέσω

Ειδομένης) σε μειωμένους χρόνους δρομολογίου κατά 40% 25% και 35% αντίστοιχα, καθώς και αύξηση των σιδηροδρομικών υπηρεσιών από πέντε αμαξοστοιχίες ανά ημέρα σε μία αμαξοστοιχία ανά ώρα. Η υλοποίηση του στόχου ανάπτυξης των εμπορευματικών μεταφορών στην Ελληνική επικράτεια εύλογα θα οδηγήσει και στην αύξηση της ποσότητας επικίνδυνων φορτίων που θα μεταφέρονται ιδιαίτερα στο ελληνικό οδικό και σιδηροδρομικό δίκτυο.

Εικόνα 1: Προτεινόμενα μέτρα οδικών υποδομών ΕΣΣΜ (πηγή: ΕΣΣΜ 2037-ΥΠΥΜΕ)



Εικόνα 2: Προτεινόμενα μέτρα σιδηροδρ. υποδομών ΕΣΣΜ (πηγή: ΕΣΣΜ 2037-ΥΠΥΜΕ)



Ως ακόλουθο της αυξανόμενης ζήτησης στην μεταφορά επικίνδυνων φορτίων προκύπτει η αυξανόμενη πιθανότητα ατυχήματος. Σημειώνεται ότι σύμφωνα με τα στοιχεία της Eurostat (Eurostat, 2019) τα έτη 2007 έως 2015 στην Ευρωπαϊκή Ένωση των 28 χωρών, κατά μέσο όρο συνέβησαν 44 ατυχήματα ανά έτος κατά την σιδηροδρομική μεταφορά επικίνδυνων φορτίων (Πίνακας 1.4).

Πίνακας 1.4: Ετήσιος αριθμός ατυχημάτων εμπλεκόμενων με την μεταφορά επικίνδυνων ουσιών 2004-2015 (πηγή: (Eurostat, 2019))

GEO/ TIME	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
European Union - 28 countries	48	54	44	37	46	61	48	30	31	:
European Union - 27 countries (2007-2013)	48	54	44	37	46	61	48	30	31	:
Belgium	3	4	0	2	0	2	1	1	0	:
Bulgaria	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
Czechia	0	0	0	0	0	0	0	0	1	:
Denmark	0	4	0	1	3	1	0	0	2	:
Germany	0	3	2	8	2	3	3	6	1	:
Estonia	0	0	0	0	0	0	0	0	0	:
Ireland	0	0	0	0	0	0	0	0	0	:
Greece	0	0	0	0	0	0	0	0	0	:
Spain	0	2	0	0	0	0	0	0	0	:
France	2	5	4	0	0	3	0	0	0	:
Croatia	0	0	0	0	0	0	0	0	0	:
Italy	0	0	2	5	0	0	0	1	0	:
Cyprus	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:
Latvia	1	1	2	2	2	2	2	2	0	:
Lithuania	2	0	1	3	3	12	10	3	3	4
Luxembourg	0	0	0	0	0	0	0	0	0	:
Hungary	2	0	0	1	0	0	0	0	0	:
Malta	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:
Netherlands	4	1	1	0	2	6	1	0	0	:
Austria	25	33	28	12	26	27	23	8	19	:
Poland	1	0	2	1	5	4	4	1	3	:
Portugal	0	0	0	0	0	0	0	0	0	:
Romania	0	0	1	1	1	0	0	0	0	:
Slovenia	0	0	0	0	0	0	0	0	0	:
Slovakia	0	0	0	0	0	0	0	0	0	:
Finland	0	0	0	0	0	1	1	4	1	:
Sweden	0	1	0	0	0	0	0	4	0	:
United Kingdom	8	0	1	1	2	0	3	0	0	:
Liechtenstein	0	0	0	0	0	0	0	0	0	:
Norway	0	0	0	0	2	0	0	0	2	:
Switzerland	:	3	0	1	1	0	0	0	0	:
Montenegro	:	:	:	:	:	:	0	0	0	:
North Macedonia	:	:	:	0	0	0	0	0	0	:
Turkey	0	0	3	2	3	3	6	0	0	:
UNIT	Number						Last update		18.03.19	
ACCIDENT	Accidents involving transport of dangerous goods						Extracted on		16.10.19	
Source of data	Eurostat									

Τα ατυχήματα με εμπλοκή επικίνδυνων φορτίων είναι πιο συχνά και ιδιαίτερα καταστροφικά σε χώρες παραγωγής πετρελαίου ή αερίου όπου όμως δεν τηρούνται αυστηροί κανόνες ασφαλείας ή δεν υπάρχει η απαραίτητη υποδομή, παρότι η διέλευση επικίνδυνων φορτίων είναι πιο συχνή, δηλαδή χώρες της μέσης Ανατολής, της Ασίας και της Αφρικής. Ο οργανισμός Ηνωμένων Εθνών μηνιαίως καταγράφει δεκάδες ατυχημάτων με εμπλοκή επικίνδυνων φορτίων. Πιο πρόσφατο θανατηφόρο ατύχημα καταγράφηκε τον Μάιο 2019 στην Νιαμέι του Νίγηρα όπου ανετράπη πετρελαιοφόρο φορτηγό προκαλώντας τον θάνατο 58 ατόμων και πολύ σοβαρά εγκαύματα σε άλλους 48, καθώς και το 2017 στο Πακιστάν με την έκρηξη βυτιοφόρου φορτηγού με καύσιμα που κόστισε τη ζωή σε 200 άτομα, και στο νότιο Ιράν το 2013 με την έκρηξη πετρελαιοφόρου

φορτηγού που προκάλεσε 90 νεκρούς και 119 σοβαρά τραυματίες (UNECE, 2019) (RFI News, 2019) (BBC News, 2019)

Παρότι η πιθανότητα ατυχήματος κατά την μεταφορά επικίνδυνων φορτίων είναι ιδιαίτερα μικρή, οι επιπτώσεις ενός ατυχήματος είναι ιδιαίτερα σοβαρές και πολλές φορές ολέθριες. Και τούτο διότι στην περίπτωση ατυχήματος από την εμπλοκή μέσου μεταφοράς επικίνδυνου φορτίου οι επιπτώσεις δεν περιορίζονται στους εμπλεκόμενους αλλά επεκτείνονται στον πληθυσμό που Εκτίθεται προκαλώντας ανθρώπινες απώλειες και στο φυσικό και το υλικό περιβάλλον προκαλώντας καταστροφή και μεγάλου κόστους υλικές ζημιές.

Η μεταφορά επικίνδυνων φορτίων λαμβάνει ιδιαίτερης προσοχής από τις αρμόδιες αρχές και τους θεσμούς υπεύθυνους για την ασφάλεια του μεταφορικού έργου, δεδομένων των ιδιαιτεροτήτων της. Λόγου χάρη στις περισσότερες περιπτώσεις ο τόπος προορισμού των επικίνδυνων φορτίων βρίσκεται πολύ μακριά από τον τόπο παραγωγής ή επεξεργασίας τους. Ως εκ τούτου απαιτείται η μεταφορά τους σε σημαντικά μεγάλες διαδρομές αυξάνοντας με αυτόν τον τρόπο την πιθανότητα ατυχήματος. Μία πρόσθετη ιδιαιτερότητα αποτελεί το γεγονός ότι τα μεταφερόμενα επικίνδυνα φορτία, ιδιαιτέρως οι εκρηκτικές ουσίες μπορούν να αποτελέσουν στόχο τρομοκρατικής επίθεσης που επιδιώκει είτε την καταστροφή τους, προκειμένου να μην χρησιμοποιηθούν από αντιπάλους τους, είτε την κλοπή τους για ίδια χρήση. Αποτέλεσμα η αύξηση της πιθανότητας ατυχήματος κατά την μεταφορά των φορτίων αυτών.

Συμπερασματικά αφενός η αυξανόμενη ανάγκη μεταφοράς επικίνδυνων φορτίων παγκοσμίως αφετέρου οι καταστρεπτικές συνέπειες ενός ενδεχόμενου ατυχήματος έχουν ήδη απασχολήσει παγκόσμιους οργανισμούς, κυβερνήσεις, τη βιομηχανία και λοιπούς εμπλεκόμενους φορείς προκειμένου να μειωθεί η πιθανότητα ατυχήματος κατά τη μεταφορά των επικίνδυνων φορτίων, να προληφθούν τέτοια ατυχήματα ή να μειωθεί η δριμύτητα των επιπτώσεων τους.

Ιδιαίτερα σε ότι αφορά στο πεδίο της έρευνας των μεταφορών, η μεταφορά των επικίνδυνων φορτίων έχει ήδη αποτελέσει πηγή προσέλκυσης του ακαδημαϊκού κόσμου. Η έρευνα εστιάζεται στην επίλυση των εξής προβλημάτων κατά την μεταφορά επικίνδυνων φορτίων: (i) την εκτίμηση της επικινδυνότητας (ii) τη δρομολόγηση (iii) τη βέλτιστη επιλογή ζεύγους εκκίνησης και προορισμού και επαναδρομολόγηση διαδρομής (iv) το σχεδιασμό δικτύου (Ditta, et al., 2018). Επίσης η έρευνα κατηγοριοποιείται και αναλόγως του τρόπου μεταφοράς των ΕΦ (οδική, σιδηροδρομική, θαλάσσια ή συνδυασμένες μεταφορές). Στόχο των μελετητών αποτελεί ο υπολογισμός της επικινδυνότητας κατά τις φάσεις μεταφοράς των ΕΦ υπό την χρήση διαφορετικών μέσων μεταφοράς (ή

συνδυασμό αυτών) και υπό την χρήση εναλλακτικών δικτύων προκειμένου να επιλεγεί η βέλτιστη διαδρομή και να μειωθεί ο κίνδυνος .

Εστιάζοντας περαιτέρω στην πρόσφατη βιβλιογραφία, επίκεντρο των τελευταίων πέντε ετών αποτελεί κυρίως η βελτιστοποίηση της σιδηροδρομικής μεταφοράς των επικίνδυνων φορτίων από σκοπιάς μείωσης της επικινδυνότητας, του μεταφορικού κόστους και χρόνου. Επίσης αξιοσημείωτη είναι η μελέτη πολυτροπικών συστημάτων μεταφοράς και ιδιαίτερα του συνδυασμού οδικής και σιδηροδρομικής μεταφοράς, όπου ο σιδηρόδρομος κατέχει την ηγετική θέση του συστήματος διανύοντας το μεγαλύτερο ποσοστό της απόστασης, ενώ τα οδικά μέσα μεταφοράς επικουρούν στην μεταφορά από/προς τον τόπο παραγωγής/ζήτησης και το αρχικό/τερματικό εμπορευματικό σιδηροδρομικό κέντρο. Η τάση αυτή οφείλεται στη ραγδαία ανάπτυξη που ο τομέας της σιδηροδρομικής εμπορευματικής μεταφοράς υφίσταται σε παγκόσμιο επίπεδο εξαιτίας των σαφών πλεονεκτημάτων ταχύτητας, ακρίβειας και ασφάλειας που διαθέτει έναντι της οδικής μεταφοράς φορτίων, επικίνδυνων και μη.

Στην Ελληνική επικράτεια παρότι η σιδηροδρομική μεταφορά επικίνδυνων φορτίων βρίσκεται σε πρώιμο στάδιο, διαθέτει προοπτικές ανάπτυξης κυρίως εξαιτίας του εκσυγχρονισμού του δικτύου και της επέκτασης και σύνδεσης του με σημαντικούς μεταφορικούς κόμβους όπως εμπορικούς λιμένες (Πειραιά, Θεσσαλονίκης, Πάτρας, Αλεξανδρούπολης, Καβάλας) και διασυνοριακούς σταθμούς (Κρυσταλλοπηγής, Ειδομένης, Προμαχώνα & Ορμενίου). Επομένως η περαιτέρω έρευνα του ελληνικού σιδηροδρομικού έργου μεταφοράς επικίνδυνων φορτίων και η εφαρμογή των σύγχρονων μεθοδολογιών υπολογισμού μεταφορικής επικινδυνότητας και βελτιστοποίησης των δρομολογίων αποτελούν ένα τομέα προσέλκυσης ακαδημαϊκού ενδιαφέροντος.

Στα πλαίσια των παραπάνω αναφερόμενων, η παρούσα διπλωματική εργασία αποτελεί ένα βήμα έρευνας και εξέτασης των πρόσφατων ερευνητικών προτάσεων της διεθνούς βιβλιογραφίας που επικεντρώνονται στην εκτίμηση της επικινδυνότητας κατά τη σιδηροδρομική, οδική και πολυτροπική μεταφορά επικίνδυνων φορτίων, καθώς και στην εφαρμογή ενός μοντέλου εκτίμησης της επικινδυνότητας στο ελληνικό σιδηροδρομικό δίκτυο. Στόχος της διπλωματικής εργασίας είναι η παρουσίαση και κατανόηση των σύγχρονων εργαλείων που έχουν αναπτυχθεί στον τομέα αυτό και η εφαρμογή και παρουσίαση ενός μοντέλου εκτίμησης επικινδυνότητας στο πιο διαδεδομένο εμπορευματικό δρομολόγιο του Ελληνικού σιδηροδρομικού δικτύου, από τον εμπορευματικό σιδηροδρομικό σταθμό Ικονίου προ τον εμπορευματικό σιδηροδρομικό σταθμό Διαλογής.

Η παρούσα διπλωματική εργασία ακολουθεί την παρακάτω δομή: Καταρχήν (στο 2^ο κεφάλαιο) γίνεται αναφορά στο νομοθετικό πλαίσιο που διέπει τις χερσαίες, θαλάσσιες και αεροπορικές μεταφορές επικινδυνων φορτίων με εκτενέστερη αναφορά στα νομοθετήματα που αφορούν στο ελληνικό σιδηροδρομικό μέσο. Στο επόμενο κεφάλαιο (3^ο κεφάλαιο) παρουσιάζονται εισαγωγικές έννοιες, όπως της μεταφορικής επικινδυνότητας και τα μεγέθη μέτρησής της, της μελέτη εκτίμησης επικινδυνότητας και το περιεχόμενο της, του ατυχήματος με εμπλοκή επικινδύνου φορτίου και τα φαινόμενα εξέλιξής τους καθώς και μέσα υπολογισμού των επιπτώσεων τους. Στο επόμενο κεφάλαιο (4^ο κεφάλαιο) παρουσιάζονται οι προτεινόμενες μεθοδολογίες εκτίμησης επικινδυνότητας στο σιδηροδρομικό και οδικό δίκτυο, καθώς και στη συνδυασμένη διατροπική μεταφορά επικινδυνων φορτίων. Στο 5^ο κεφάλαιο παρουσιάζεται η εφαρμογή του μοντέλου εκτίμησης επικινδυνότητας στο ελληνικό σιδηροδρομικό δίκτυο και τέλος στο 6^ο κεφάλαιο τα συμπεράσματα της εργασίας.

2. Νομοθετικό Πλαίσιο για Μεταφορές Επικίνδυνων Φορτίων

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται αναφορά στους διεθνείς κανονισμούς που διέπουν τις χερσαίες, θαλάσσιες και αεροπορικές μεταφορές επικίνδυνων φορτίων, ενώ στο δεύτερο μέρος σημειώνονται επιπλέον νομοθετήματα με επισήμανση στο οδικό και σιδηροδρομικό μέσο και δίκτυο μεταφοράς ΕΦ.

2.1 Διεθνείς κανονισμοί για την μεταφορά των επικίνδυνων φορτίων

Για την μεταφορά των επικίνδυνων φορτίων ο οργανισμός Ηνωμένων Εθνών, υπό τις ειδικές και αρμόδιες επιτροπές ή και οργανισμούς του, έχει εκδώσει κανονισμούς ή συστάσεις προκειμένου να υιοθετηθούν από τις χώρες –μέλη του Οργανισμού που επιθυμούν και τα αποδέχονται. Περαιτέρω για τις χώρες που ανήκουν στην Ευρωπαϊκή Ένωση ισχύει η Αρχή της Ελεύθερης Κίνησης μεταξύ των χωρών- μελών της, γνωστή και ως οι «τέσσερις ελευθερίες» εννοώντας: την ελεύθερη διακίνηση παροχής υπηρεσιών και εγκατάστασης, την ελεύθερη μετακίνηση ανθρώπων, την ελεύθερη κίνηση κεφαλαίου και την ελεύθερη μετακίνηση αγαθών, συνεπάγοντας την μη ύπαρξη διακρίσεων και μεροληπτικών κανόνων που να παρεμποδίζουν την μετακίνηση αγαθών (συμπεριλαμβανομένων των επικίνδυνων φορτίων) μεταξύ των χωρών μελών της ΕΕ εκτός από τους περιορισμούς που κοινά εφαρμόζονται μέσω της Ευρωπαϊκής νομοθεσίας από όλα τα μέλη της. Ειδικά για την μεταφορά των επικίνδυνων φορτίων έχουν νομοθετηθεί οι αντίστοιχες Ευρωπαϊκές οδηγίες. Οι διεθνείς συμφωνίες και οι αντίστοιχες Ευρωπαϊκές οδηγίες παρουσιάζονται παρακάτω ανά μεταφορικό μέσο.

- **Για τις οδικές μεταφορές** επικίνδυνων φορτίων ο ΟΗΕ μέσω της αρμόδιας Οικονομικής Επιτροπής για την Ευρώπη (UNECE) εκδίδει την «Συμφωνία για τη Διεθνή Οδική Μεταφορά Επικίνδυνων Φορτίων» γνωστή ως «Accord Dangereux Routier» ή με το ακρωνύμιο «ADR». Η ADR πρώτη φορά εκδόθηκε στη Γένοβα το 1957 και τέθηκε σε ισχύ στις 29 Ιανουαρίου 1968. Το σώμα της συμφωνίας υιοθετήθηκε από την Ευρωπαϊκή Ένωση και αποτέλεσε τη βάση για την έκδοση της Ευρωπαϊκής Οδηγίας 2008/68/EC η οποία και ενσωματώθηκε από τα κοινοβούλια των ΕΕ μελών στις αντίστοιχες εθνικές νομοθεσίες τους. Σημειώνεται ότι η συμφωνία αυτή, η οποία έως πρότινος ονομαζόταν Ευρωπαϊκή Συμφωνία και μετονομάστηκε προκειμένου να μην σημειολογεί την ισχύ της μόνο εντός

του Ευρωπαϊκού οδικού δικτύου, έχει υιοθετηθεί και εφαρμόζεται από πολλές χώρες μέλη του ΟΗΕ εκτός Ευρωπαϊκών συνόρων ή Ευρωπαϊκής Ένωσης. Η ADR αναθεωρείται κάθε δύο έτη. Από την 1 Ιανουαρίου 2019 έχει τεθεί σε ισχύ η ADR 2019 η οποία έχει ενσωματώσει όλες τις τροποποιήσεις που έχει προτείνει η αρμόδια ομάδα εργασίας (Working Party 15) της UNECE σε συνεργασία με τη Διεθνή Ένωση Οδικών Μεταφορών (IRU) τα έτη 2017, 2018. (UNECE, 2019)

Περαιτέρω κάθε χώρα συνυπογράφουσα τους κανονισμούς ADR, διατηρεί το δικαίωμα να νομοθετεί ή να απαγορεύει την διέλευση ΕΦ εντός της επικράτειας της για λόγους διαφορετικούς της ασφάλειας κατά την μεταφορά, καθώς επίσης διατηρεί το δικαίωμα να επιτρέπει την μεταφορά των ΕΦ που η ADR απαγορεύει μέσω διμερών ή πολυμερών συμφωνιών, εντός της επικράτειας της και κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες. Τέλος διατηρεί το δικαίωμα να εφαρμόζει λιγότερο αυστηρούς κανόνες από αυτούς που περιγράφονται στην ADR για τα επικίνδυνα φορτία που ο κανονισμός ADR επιτρέπει στη διεθνή μεταφορά τους, εντός της επικράτειας τους. (UNECE & IRU, 2019)

- ο **Για τις σιδηροδρομικές μεταφορές** επικίνδυνων φορτίων, ο οργανισμός Ηνωμένων εθνών έχει υιοθετήσει τον «Κανονισμό για τις διεθνείς σιδηροδρομικές μεταφορές επικίνδυνων εμπορευμάτων» γνωστός με το ακρωνύμιο «RID» όπως εκπονήθηκε από τον Διακυβερνητικό Οργανισμό για τις Σιδηροδρομικές Μεταφορές (Organisation intergouvernementale pour les transports internationaux ferroviaires - OTIF). Ως αποτέλεσμα των εργασιών συντονισμού μεταξύ της UNECE και του OTIF, οι διατάξεις για τις σιδηροδρομικές μεταφορές επικίνδυνων εμπορευμάτων είναι επίσης εναρμονισμένες με τις διατάξεις για τις οδικές μεταφορές (ADR) και τις εσωτερικές πλωτές μεταφορές (ADN). Το σώμα του κανονισμού RID έχει επίσης υιοθετηθεί από την Ευρωπαϊκή Ένωση και έχει αποτελέσει τη βάση για την έκδοση της Ευρωπαϊκής Οδηγίας 2008/68 / EC και συνεπακόλουθα έχει ενσωματωθεί στις εθνικές νομοθεσίες των μελών κρατών της. Ο κανονισμός RID εφαρμόζεται στη διεθνή κυκλοφορία, καθώς ο OTIF διαθέτει 50 κράτη μέλη και 1 συγγενικό μέλος. Αναθεωρείται κάθε δύο έτη. (OTIF, 2019)
- ο **Οι θαλάσσιες μεταφορές** επικίνδυνων φορτίων διέπονται από τον Διεθνή Ναυτιλιακό Κώδικα Επικίνδυνων Φορτίων (International Maritime Dangerous Goods Code ή για συντομία με το ακρωνύμιο IMDG Code). Ο κώδικας αυτός εκδίδεται από τον Διεθνή Ναυτιλιακό Οργανισμό - International Maritime Organization και εν συντομία IMO, κάθε δύο έτη.

Από 1.1.2020 ισχύει η νέα έκδοση 2018. Ο IMO είναι ο εξειδικευμένος οργανισμός των Ηνωμένων Εθνών με αρμοδιότητα την ασφάλεια της ναυτιλίας ανοικτών θαλασσών και την πρόληψη της θαλάσσιας και ατμοσφαιρικής ρύπανσης από τα πλοία κινούμενα στις ανοικτές θάλασσες. (IMO, 2018).

- ο **Για τις πλωτές μεταφορές** επικίνδυνων φορτίων εντός χωρών, από την 29.2.2008 έχει τεθεί σε ισχύ η «Ευρωπαϊκή συμφωνία για τη διεθνή μεταφορά επικίνδυνων εμπορευμάτων από τις εσωτερικές πλωτές οδούς - European Agreement concerning the International Carriage of Dangerous Goods by Inland Waterways» ή εν συντομία AND), όπως εκδόθηκε από την UNECE σε συνεργασία με την Κεντρική Επιτροπή για τη Ναυσιπλοΐα του Ρήνου- Central Commission for the Navigation of the Rhine (CCNR). Το σώμα της συμφωνίας αυτής έχει ενσωματωθεί στην Ευρωπαϊκή οδηγία 2008/68/EC και αποτελεί διεθνή νομοθεσία των κρατών μελών της Ε.Ε. (UNECE & CCNR, 2008)
- ο Τέλος **για τις αεροπορικές μεταφορές**, ο Διεθνής Οργανισμός Πολιτικής Αεροπορίας- ICAO (International Civil Aviation Organization) εξέδωσε την τελευταία έκδοση 2017-2018 τις «Τεχνικές Οδηγίες για την Ασφαλή Μεταφορά Επικίνδυνων Εμπορευμάτων Αεροπορικώς (Technical Instructions for the Safe Transport of Dangerous Goods by Air)». Ο Οργανισμός αυτός που είναι τμήμα του ΟΗΕ, ρυθμίζει τις διεθνείς αερομεταφορές και ιδρύθηκε το 1947. Επιπλέον η Διεθνής Ένωση Αεροπορικών Μεταφορών -IATA (International Air Transport Association) σε συνδυασμό με τον ICAO εξέδωσε τον Κανονισμό Επικίνδυνων Φορτίων (Dangerous Goods Regulations- DGR , έκδοση 2020 με ισχύ από 31/1/2021). (IATA, 2020) (ICAO, 2018)

Βάσει όλων των παραπάνω διεθνών συμφωνιών που διέπουν την μεταφορά επικίνδυνων φορτίων (ADR, RID, IMDG, AND, IATA DGR) ως επικίνδυνα φορτία ορίζονται όλες οι ουσίες ή οι ύλες των οποίων η διεθνής μεταφορά εντός των αντίστοιχων δικτύων (οδικών, σιδηροδρομικών, θαλάσσιων πλωτών και αεροπορικών) των χωρών που προσυπογράφουν και τις αποδέχονται, απαγορεύεται ή επιτρέπεται μόνο υπό τους όρους και τις συνθήκες των εν λόγω συμφωνιών. Επιπλέον οι διεθνείς αυτοί κανονισμοί, κατηγοριοποιούν τα επικίνδυνα φορτία στις παρακάτω εννέα κλάσεις:

- Κλάση 1: Εκρηκτικές ουσίες και είδη
- Κλάση 2: Αέρια

- Κλάση 3: Εύφλεκτα υγρά
- Κλάση 4.1: Εύφλεκτα στερεά, αυτό- δραστικές ουσίες, πολυμεριστικές ουσίες και στερεά απευαισθητοποιημένα εκρηκτικά
- Κλάση 4.2: ουσίες αυτό-αναφλεγόμενες
- Κλάση 4.3: ουσίες οι οποίες σε επαφή με νερό εκπέμπουν εύφλεκτα αέρια
- Κλάση 5.1: οξειδωτικές ουσίες
- Κλάση 5.2: Οργανικά υπεροξειδία
- Κλάση 6.1: Τοξικές ουσίες
- Κλάση 6.2: Μολυσματικές ουσίες
- Κλάση 7: Ραδιενεργή ύλη
- Κλάση 8: Διαβρωτικές ουσίες
- Κλάση 9: Διάφορες επικίνδυνες ουσίες και είδη (οι οποίες κατά την μεταφορά παρουσιάζουν κινδύνους που δεν καλύπτονται από τις προαναφερόμενες κλάσεις)

Επίσης κάθε ουσία που καταχωρείται σε μια από τις κλάσεις λαμβάνει ένα κωδικοποιημένο αριθμό UN. Σημειώνεται ότι η κατηγοριοποίηση των ουσιών στις κλάσεις, η καταχώρηση τους με κωδικούς UN, οι κανόνες συσκευασίας τους, η σήμανση και η ετικετοποίηση των φορτίων που κανονίζεται στις εν λόγω συμφωνίες ADR, RID, IMDG, AND, IATA DGR είναι κοινή.

Ειδικά για τις οδικές και σιδηροδρομικές μεταφορές που αποτελούν αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας, αμέσως παρακάτω αναφέρεται συνοπτικά το περιεχόμενο των αντίστοιχων διεθνών συμφωνιών:

- Η συμφωνία ADR των οδικών μεταφορών ΕΦ, περαιτέρω της αναγνώρισης, αντιστοίχησης ή ταξινόμησης των ουσιών (μέρος 2 & 3 της ADR) και των γενικών ή ειδικών διατάξεων για την επιλεγόμενη συσκευασία (μέρος 4 και 6) περιλαμβάνουν διατάξεις σχετικά με την σήμανση και επισήμανση οχημάτων και συσκευασιών (μέρη 5 και 6). Επίσης το μέρος 7 περιλαμβάνει τις προβλέψεις σχετικά με τις προϋποθέσεις μεταφοράς, φόρτωσης, εκφόρτωσης και χειρισμού των επικίνδυνων φορτίων. Το μέρος 8 περιλαμβάνει τις απαιτήσεις για το προσωπικό –χειριστές των οχημάτων, τον εξοπλισμό και λειτουργία τους καθώς και τα απαιτητά έγγραφα που συνοδεύουν τη μεταφορά των επικίνδυνων φορτίων. Τέλος το μέρος 9 περιλαμβάνει τις απαιτήσεις σχετικά με την κατασκευή και την έγκριση των οχημάτων μεταφοράς επικίνδυνων φορτίων.
- Η συμφωνία RID των σιδηροδρομικών μεταφορών ΕΦ, στο πρώτο μέρος της δίνει γενικές απαιτήσεις σχετικά με γενικούς περιορισμούς, εφαρμοσιμότητα της συμφωνίας, την εκπαίδευση εμπλεκομένων, τις

υποχρεώσεις συμμετεχόντων για την ασφάλεια, τους περιορισμούς από τις αρμόδιες αρχές, τους ελέγχους και άλλα υποστηρικτικά μέτρα ασφάλειας, τα εσωτερικά σχέδια έκτακτης ανάγκης σε σταθμούς διαλογής κ.α.) Το δεύτερο μέρος αφορά την ταξινόμηση των ουσιών στις κλάσεις και τις προβλέψεις για κάθε κλάση, ενώ το τρίτο μέρος περιλαμβάνει την καταγραφή των ΕΦ. Το τέταρτο μέρος αναφέρει τις προβλέψεις συσκευασίας και ειδικά την χρήση τύπων δεξαμενών, ενώ το πέμπτο μέρος περιγράφει τις προβλεπόμενες διαδικασίες κατά την αποστολή ΕΦ και τους κανόνες σήμανσης και επισήμανσης. Στο έκτο μέρος δίνονται οι απαιτήσεις για την κατασκευή και δοκιμή των συσκευασιών, των εμπορευματοκιβωτίων ενδιάμεσης αποθήκευσης και των μεγάλων συσκευασιών και δεξαμενών. Στο τελευταίο μέρος δίνονται οι προβλέψεις σχετικά με τις συνθήκες μεταφοράς, φόρτωσης, εκφόρτωσης και χειρισμού.

2.2 Πρόσθετες Ευρωπαϊκές Οδηγίες & Ελληνική Νομοθεσία

Στο κανονιστικό πλαίσιο της μεταφοράς επικίνδυνων φορτίων εντάσσονται και οι παρακάτω Ευρωπαϊκές Οδηγίες, κανονισμοί και Ελληνικές αποφάσεις:

- Σχετικά με τη διαχείριση των επικίνδυνων φορτίων έχουν εκδοθεί επιπλέον δύο Ευρωπαϊκές Οδηγίες. Συγκεκριμένα η οδηγία 2004/54/ΕΚ της 29.04.2004 σχετικά με τις ελάχιστες απαιτήσεις ασφαλείας για τις σήραγγες του Διευρωπαϊκού Οδικού Δικτύου μεταφοράς και η 2010/40/ΕΚ, της 7.07.2010, περί πλαισίου ανάπτυξης των Συστημάτων Ευφυών Μεταφορών στον τομέα των οδικών μεταφορών και των διεπαφών με άλλους τρόπους μεταφοράς.
- Την Ευρωπαϊκή Οδηγία 2016/798 του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου για την ασφάλεια των σιδηροδρόμων, η οποία μεταξύ άλλων ενσωματώνει τις «Κοινές Μεθόδους Ασφάλειας», τους «Κοινούς Στόχους Ασφάλειας» και το σύστημα διαχείρισης της Ασφάλειας που αρμόδιες εθνικές αρχές ασφαλείας καθορίζουν και εγκρίνουν.
- Σχετικά με την τεχνική προδιαγραφή διαλειτουργικότητας για το υποσύστημα «διεξαγωγή και διαχείριση της κυκλοφορίας» του σιδηροδρομικού συστήματος της Ευρωπαϊκής Ένωσης, ο Εκτελεστικός Κανονισμός 2019/773 της Ευρωπαϊκής επιτροπής 16.05.2019

- Ο κανονισμός 1272/2008 του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου της 16ης Δεκεμβρίου 2008 για την ταξινόμηση, την επισήμανση και τη συσκευασία των ουσιών και των μειγμάτων.
- Η Οδηγία Seveso-III 2012/18/ΕΕ του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου της 4ης Ιουλίου 2012 για την αντιμετώπιση των κινδύνων μεγάλων ατυχημάτων σχετιζόμενων με επικίνδυνες ουσίες.
- Το ΦΕΚ 698 1.03/2019 Τροποποίηση του Γενικού Κανονισμού Κινήσεως - Μέρος Β' (Κανονισμός Κυκλοφορίας και Ελιγμών Σιδηροδρόμων)
- Το ΦΕΚ 3135/ 31.7.2018 περί παραβάσεων της νομοθεσίας οδικών μεταφορών επικίνδυνων εμπορευμάτων, κατάταξη των παραβάσεων σε κατηγορίες και διοικητικές κυρώσεις.
- Το ΦΕΚ Α'188/ 3891/2010 που συστήνει την Ρυθμιστική Αρχή Σιδηροδρόμων με αρμοδιότητα- μεταξύ άλλων- τη λειτουργία της ως η Εθνική Αρχή Ασφάλειας για τις σιδηροδρομικές μεταφορές ασκώντας τις αρμοδιότητες της Αρχής Ασφάλειας Σιδηροδρομικών Μεταφορών και τα καθήκοντα της «αρμόδιας αρχής» σχετικά με τις διεθνείς μεταφορές επικίνδυνων εμπορευμάτων.

3. Γενικό Πλαίσιο Μελέτης Εκτίμησης Επικινδυνότητας κατά την Μεταφορά Επικίνδυνων Φορτίων.

Κατά τον σχεδιασμό μεταφορικών συστημάτων και ιδιαίτερα εμπορευματικών μεταφορών, στόχοι του σχεδιασμού είναι η εξασφάλιση της μέγιστης δυνατής ασφάλειας, της μέγιστης δυνατής αποδοτικότητας και αποτελεσματικότητας στη διακίνηση του φορτίου και της ποιότητας των υπηρεσιών που αφορούν τις αλυσίδες τροφοδότησης και διακίνησης φορτίων. Ιδιαίτερα στην περίπτωση μεταφοράς επικίνδυνων φορτίων, η έννοια της εξασφάλισης της μέγιστης ασφάλειας μεταφράζεται στην *μείωση της επικινδυνότητας* που η μεταφορά επικίνδυνων φορτίων μέσω των κοινών οδικών, σιδηροδρομικών και λοιπών δικτύων προκαλεί δεδομένου ότι στην περίπτωση ατυχήματος και διαρροής του επικίνδυνου εμπορεύματος οι επιπτώσεις μπορεί να διαβούν μοιραίες.

Άλλωστε η επίτευξη των επιπέδων ασφαλείας των μεταφορικών συστημάτων θεσπίζεται από τις Ευρωπαϊκές οδηγίες και τις αντίστοιχες εθνικές νομοθεσίες, οι οποίες- μεταξύ άλλων- κανονίζουν τα ελάχιστα επίπεδα ασφαλείας, την ανάγκη αξιολόγησης και εκτίμησης των κινδύνων και τα συστήματα διαχείρισης της ασφάλειας που οι διαχειριστές υποδομής θεσπίζουν (βλέπε 2^ο κεφάλαιο). Στο πλαίσιο αυτό *της διαχείρισης της ασφάλειας των επικίνδυνων φορτίων* απαραίτητο στάδιο της μελέτης αποτελεί η διαδικασία εκτίμησης της επικινδυνότητας της διαδρομής που ακολουθεί το επικίνδυνο φορτίο από το σημείο εκκίνησης του έως τον τελικό προορισμό. Η διαδρομή αυτή συνήθως αποτελείται από επιμέρους τμήματα, είτε μεταξύ σταθμών μεταφόρτωσης του φορτίου, είτε εξαιτίας ιδιαίτερων χαρακτηριστικών κάποιων τμημάτων (π.χ. σήραγγες ή εναλλαγή από αυτοκινητόδρομο σε πρωτεύον ή δευτερεύον επαρχιακό δίκτυο) είτε κοινών χαρακτηριστικών (πυκνότητα πληθυσμού, πιθανότητα συμβάντος διαρροής ΕΦ) είτε διαφορετικών μέσων μεταφοράς στην περίπτωση πολυτροπικότητας του συστήματος μεταφοράς (λ.χ. εναλλαγή οδικού και σιδηροδρομικού δικτύου). Άλλωστε η συνολική διαδρομή του επικίνδυνου φορτίου από το σημείο παραγωγής του έως το σημείο παράδοσής του αποτελεί την μεταφορική αλυσίδα του φορτίου, η οποία ανάλογα με το μέσο μεταφοράς του διαφοροποιείται ως εξής: (i) Στην περίπτωση σιδηροδρομικής μεταφοράς ΕΦ, η μεταφορική αλυσίδα περιλαμβάνει το δίκτυο από τον εμπορευματικό σταθμό διαλογής όπου το φορτίο φορτώνεται στην αμαξοστοιχία και μεταφέρεται μέσω του σιδηροδρομικού δικτύου είτε προς τον επόμενο σταθμό/ κόμβο όπου μεταφορτώνεται σε επόμενη αμαξοστοιχία είτε στον τελικό σταθμό διανομής από όπου παραλαμβάνεται από τον παραλήπτη. Στην περίπτωση που το δρομολόγιο δεν σταματά σε ενδιάμεσους κόμβους, χαρακτηρίζεται ως non stop δρομολόγιο.

(ii) Στην περίπτωση διατροφικού συστήματος μεταφοράς η αλυσίδα περιλαμβάνει την οδική μεταφορά από το σημείο παραγωγής του έως τον εμπορευματικό σιδηροδρομικό σταθμό συλλογής, όπου το φορτίο φορτώνεται στην αμαξοστοιχία και μεταφέρεται μέσω σιδηροδρομικού δικτύου είτε σε επόμενο κόμβο μεταφόρτωσης, είτε στον τελικό σταθμό διανομής, από όπου συνεχίζει την πορεία του οδικώς έως το σημείο παράδοσης. Επιπλέον ενδέχεται η πολλαπλή εναλλαγή των μέσων σε περίπτωση όπου το σιδηροδρομικό δίκτυο δεν καλύπτει τμηματικά το σύνολο της διαδρομής. (iii) Παρομοίως στην περίπτωση της οδικής μεταφοράς ΕΦ, το φορτίο ξεκινά από το σημείο παραγωγής του και κινείται οδικά προς το σημείο προορισμού ή με ενδιάμεση στάση σε κάποιο κέντρο διανομής.

Όπως προκύπτει από την έρευνα της διεθνούς βιβλιογραφίας και νομοθεσίας στο ζητούμενο της μεταφοράς επικίνδυνων φορτίων, η διαδικασία εκτίμησης της επικινδυνότητας μιας διαδρομής ή ενός μεταφορικού συστήματος, δεν είναι κωδικοποιημένη ή θεσμοθετημένη έτσι ώστε να εφαρμόζεται εντός περιορισμένου πλαισίου και με συγκεκριμένη μεθοδολογία. Προσπαθώντας να καλύψουν το κενό αυτό, η Γενική Διεύθυνση Κινητικότητας και Μεταφορών και η Διεύθυνση Σιδηροδρόμων της Ευρωπαϊκής Ένωσης (DG Mobility and Transport of the European Commission & European Union Agency for Railways) εξέδωσαν το 2018 τον οδηγό-πλαίσιο με την ονομασία «Κανονισμός διαχείρισης κινδύνων για την χερσαία μεταφορά επικίνδυνων εμπορευμάτων» ("Risk management framework for inland transport of dangerous goods –Framework Guide" (DG Mobility and Transport of the European Commission & European Union Agency for Railways, 2018) προκειμένου να βοηθηθούν οι αρμόδιες αρχές στην εφαρμογή των νομικών απαιτήσεων που ισχύουν για τη διαχείριση των κινδύνων από τις μεταφορές επικίνδυνων εμπορευμάτων και την αξιολόγηση πιθανών μέτρων μείωσης του κινδύνου. Μερική εξαίρεση νομοθετημένου συστήματος εκτίμησης επικινδυνότητας αποτελούν οι Κάτω Χώρες που θεσμοθέτησαν ένα Κρατικό Πλαίσιο Δράσης που περιλαμβάνει οριακές τιμές επικινδυνότητας που οι διαχειριστές και μεταφορείς δεν μπορούν να ξεπερνούν.

Η δομή του παρόντος κεφαλαίου έχει ως εξής: Στην ενότητα 3.1 παρουσιάζεται μία σύντομη βιβλιογραφική ανασκόπηση με σκοπό να αποδοθούν τα μεγέθη μέτρησης της επικινδυνότητας που συναντώνται στη διεθνή βιβλιογραφία. Στην επόμενη ενότητα 3.2 δίνεται ένα γενικευμένο περίγραμμα της μελέτης εκτίμησης επικινδυνότητας όπως αποτυπώνεται σε δημοσιευμένες έρευνες και προτάσεις της διεθνούς βιβλιογραφίας που σχετίζονται με την χερσαία μεταφορά των επικίνδυνων φορτίων. Ακολούθως στην ενότητα 3.3 δίνεται η απαραίτητη ανάλυση και επεξήγηση των φαινομένων που ακολουθούν τη διαρροή ή διαφυγή επικίνδυνων ουσιών, προκειμένου να γίνουν κατανοητά τα μοντέλα

προσομοίωσης των σεναρίων ατυχημάτων που χρησιμοποιούν οι μεθοδολογίες εκτίμησης επικινδυνότητας. Στην ενότητα 3.4 παρουσιάζονται τα λογισμικά προγράμματα προσομοίωσης και εκτίμησης επιπτώσεων ατυχημάτων από διαρροή ή διαφυγή επικίνδυνων ουσιών ADAM και ALOHA που έχουν αναπτυχθεί από το Κέντρο Ερευνών της Ευρωπαϊκής Επιτροπής, και τη Διεύθυνση Προστασίας Περιβάλλοντος των ΗΠΑ αντίστοιχα, προκειμένου να υποστηρίξουν τις αρμόδιες κρατικές αρχές στην αντιμετώπιση τέτοιων ατυχημάτων. Τέλος στην ενότητα 3.4 παρουσιάζονται τα συστήματα οριακών τιμών οξείας έκθεσης σε χημικές ουσίες που έχουν αναπτυχθεί διεθνώς και χρησιμοποιούνται στον υπολογισμό της ζώνης επίδρασης των ατυχημάτων που εμπεριέχεται στις μελέτες εκτίμησης επικινδυνότητας.

3.1. Ορισμός και μεγέθη μέτρησης επικινδυνότητας

Το διεθνές Πρότυπο ISO 31000 ορίζει ως Κίνδυνο (Risk) ή Επικινδυνότητα «*τις επιπτώσεις της αβεβαιότητας πάνω στους στόχους*», ενώ στη συνήθη βιβλιογραφία με ευρύτερους όρους ορίζεται το προϊόν της πιθανότητας και οι επιπτώσεις ενός ανεπιθύμητου γεγονότος (Covello & Merkhofer, 1993)

Παρακάτω παρουσιάζονται τα μεγέθη της επικινδυνότητας που έχουν αναπτυχθεί στον τομέα της μεταφοράς επικίνδυνων φορτίων με τις σχετικές αναφορές τους, όπως προέκυψε από την βιβλιογραφική ανασκόπηση των μεθοδολογιών εκτίμησης επικινδυνότητας σε οδικό και σιδηροδρομικό δίκτυο:

(i) Η πιθανότητα ατυχήματος (incident probability, σε συντομία «IP»).
Το μέγεθος αυτό υπολογίζει την πιθανότητα να συμβεί ατύχημα κατά τη μεταφορά επικίνδυνου φορτίου το οποίο θα οδηγήσει σε διαρροή/διαφυγή της επικίνδυνης ουσίας. Η πιθανότητα ατυχήματος αποτυπώνει την επικινδυνότητα ενός δρομολογίου επικίνδυνου φορτίου, σε όρους πιθανότητας π.χ. ατυχήματα ανά διανυόμενα χιλιόμετρα. Επειδή δεν περιλαμβάνει την έννοια της επίπτωσης του ατυχήματος, είναι κατάλληλο μόνο για την μελέτη περιπτώσεων μεταφοράς ΕΦ με σχετικά μικρές επικίνδυνες ζώνες (Saccomanno & Chan, 1985) (Abkowitz, et al., 1992)

(ii) Ο εκτεθειμένος πληθυσμός (population exposure, σε συντομία «PE»). Το μέγεθος αυτό υπολογίζει τον συνολικό αριθμό ατόμων που η ζωή και η υγεία τους Εκτίθενται σε κίνδυνο εξαιτίας ατυχήματος με εμπλοκή επικίνδυνης ουσίας. Ο εκτεθειμένος πληθυσμός εκφράζει την επικινδυνότητα μιας διαδρομής

στην οποία μεταφέρεται ΕΦ σε όρους επίπτωσης του ατυχήματος π.χ. σε άτομα σε κίνδυνο και αποτελεί μια απλή έννοια, πιο ρεαλιστική και αντιληπτή στο κοινό. ((Batta & Chiu, 1988) (Revelle, et al., 1991)

(iii) Η κοινωνική διακινδύνευση (societal risk, σε συντομία «SR») Το μέγεθος αυτό αποτελεί τον παραδοσιακό ορισμό της επικινδυνότητας και εκφράζει τον αναμενόμενο αριθμό ατόμων που θα εκτεθούν από μία διαδρομή μεταφοράς επικίνδυνου φορτίου. Υπολογίζεται ως το γινόμενο του μήκους της διαδρομής, του δείκτη ατυχημάτων (πιθανότητα) της διαδρομή, της εξαρτημένης πιθανότητας διαρροής του ΕΦ λόγω του ατυχήματος, της πυκνότητας πληθυσμού της γειτνιάζουσας περιοχής, και του εμβαδού κύκλου με ακτίνα την απόσταση επιρροής του ατυχήματος. (Erkut & Verter, 1998)

(iv) Η ατομική διακινδύνευση (individual risk, σε συντομία «IR») Το μέγεθος αυτό εκφράζει την ετήσια πιθανότητα ότι ένα υποθετικό άτομο σε ένα συγκεκριμένο μέρος θα υποστεί βλάβη ή θάνατο από ατύχημα προερχόμενο από την μεταφορά ΕΦ. Ο υπολογισμός του IR είναι ανεξάρτητος από τη φυσική παρουσία ατόμων στην περιοχή ενδιαφέροντος αλλά εξαρτάται αποκλειστικά από τη διαδρομή και τον τύπο και την ποσότητα ΕΦ που μεταφέρεται σε αυτή. (Basic Network Act of the Netherlands)

(v) Η παραδοσιακή διακινδύνευση ή ρίσκο (traditional risk), σε συντομία «TR». Το μέγεθος αυτό υπολογίζει την πιθανότητα ατυχήματος με διαρροή ΕΦ πολλαπλασιασμένη με τις επιπτώσεις του ατυχήματος. Το παραδοσιακό ρίσκο εκφράζει την αναμενόμενη -μη επιθυμητή- επίπτωση κατά την μεταφορά επικίνδυνου φορτίου, όπου ως επίπτωση νοούνται κυρίως οι ανθρώπινες απώλειες και οι τραυματισμοί. Σε ορισμένες επιπτώσεις υπολογίζονται οι επιπτώσεις σε υλικές και περιβαλλοντικές καταστροφές σε εκκενώσεις κλπ. Η έννοια του παραδοσιακού ρίσκου δεν είναι ιδιαίτερα κατανοητή στο κοινό καθώς αποτελεί υποεκτίμηση ρεαλιστικού μεγέθους. (Erkut & Verter, 1998) (Erkut & V.Verter, 1995a) (Erkut & V.Verter, 1995b)

(vi) Ο αντιληπτός κίνδυνος (perceived risk, σε συντομία «PR») Το μέγεθος αυτό υπολογίζει την επικινδυνότητα που αντιλαμβάνεται το κοινό σε όρους εκτεθειμένου πληθυσμού εξαιτίας κινδύνου έκθεσης σε επικίνδυνη ουσία στον πληθυσμό που γειτνιάζει με τη διαδρομή και όχι κινδύνου ατυχήματος με ΕΦ (π.χ. ακτινοβολία από υψηλού επιπέδου πυρηνικά απόβλητα). Το μέγεθος αυτό χρησιμοποιήθηκε σε μελέτη που διεξήγαγε το Υπουργείο Ενέργειας των ΗΠΑ (Revelle, et al., 1991). Οι Abkowitz et al, 1992 ανέπτυξαν περαιτέρω το μέγεθος αυτό προκειμένου να προσδώσουν την αποστροφή του κοινού προς τον κίνδυνο μιας πολύ μεγάλης καταστροφής (ακόμα και όταν έχει πολύ μικρή πιθανότητα να

συμβεί) εφαρμόζοντας έναν εκθέτη q που εκφράζει την προτίμηση επικινδυνότητας (risk preference parameter) (Abkowitz, et al., 1992).

(vii) Η Αξία - σε – κίνδυνο (Value-at-Risk και σε συντομία «VaR») και η **υπό συνθήκη Αξία – σε - κίνδυνο (Conditional Value-at-Risk** και σε συντομία «CVaR»). Πρόκειται για μεγέθη δανεισμένα από τις οικονομικές επιστήμες, τα οποία επιμετρούν τον αριθμό των ανθρώπων που Εκτίθενται σε κίνδυνο από την μεταφορά ΕΦ, δεδομένου συγκεκριμένου διαστήματος εμπιστοσύνης. Τα μεγέθη αυτά, που μόλις τα τελευταία χρόνια αναπτύχθηκαν, εκφράζουν την αποστροφή στην κίνδυνο μιας διαδρομής μεταφοράς επικίνδυνων φορτίων και παρουσιάζονται αναλυτικά στην ενότητα 4.3 (Hosseini & Verma, 2017) (Hosseini & Verma, 2018)

3.2. Γενικά για την μελέτη εκτίμησης επικινδυνότητας μεταφοράς επικίνδυνων φορτίων

Τις τελευταίες δεκαετίες πληθώρα ερευνητών της διεθνούς ακαδημαϊκής κοινότητας, μέσω των μελετών και προτάσεων τους έχουν «καθιερώσει» τη διαδικασία εκτίμησης της επικινδυνότητας των μεταφορικών συστημάτων ιδιαιτέρως στο τομέα των εμπορευματικών μεταφορών περιλαμβανομένων και των επικίνδυνων φορτίων. Σε γενικές γραμμές τα βήματα που ακολουθούνται κατά τη διαδικασία εκτίμησης της επικινδυνότητας μιας διαδρομής ή ενός μεταφορικού συστήματος είναι τα παρακάτω:

- (i) Εξακρίβωση της κατηγορίας και του όγκου των επικίνδυνων φορτίων που διέρχονται από τη διαδρομή
- (ii) Εξακρίβωση των εύλογων σεναρίων επιπτώσεων ατυχήματος δεδομένων των ιδιοτήτων και της ποσότητας των επικίνδυνων φορτίων που μεταφέρονται
- (iii) Εκτίμηση πιθανότητας εμφάνισης ατυχήματος με εμπλοκή οχήματος που μεταφέρει επικίνδυνα φορτία και διαρροής των υλικών αυτών
- (iv) Υπολογισμός της περιοχής επίδρασης (impact area) σημειακού ατυχήματος και της ζώνης επιρροής (buzzer zone) κατά μήκος της διαδρομής, δηλαδή της συνολική περιοχή που Εκτίθεται στον κίνδυνο κατά μήκος της υπό μελέτη διαδρομής.

(v) Εκτίμηση και ποσοτικοποίηση επιπτώσεων ατυχήματος στην περιοχή επιρροής. Ο εκτεθειμένος σε κίνδυνο πληθυσμός υπολογίζεται ως το σύνολο των καταμετρημένων ανθρώπων που βρίσκονται εντός μιας συγκεκριμένης ζώνης κατά μήκος της διαδρομής, δηλαδή ο πληθυσμός που ζει ή εργάζεται εντός της ζώνης επίδρασης και οι αυτοκινητιστές που εμπλέκονται στο ατύχημα. Επίσης μπορεί να υπολογίζεται η εκτιθέμενη περιουσία, δηλαδή η ποσότητα κατοικιών και οχημάτων η έκταση αγροτικών καλλιεργειών, δασικών και ορεινών περιοχών και το εκτιθέμενο φυσικό περιβάλλον ήτοι η έκταση πιθανών οικολογικά ευαίσθητων περιοχών.

(vi) Ένα επιπλέον στάδιο μπορεί να αποτελεί ο σχεδιασμός της μεταφοράς Ε.Φ (planning of transportation of HAZMAT) και η δρομολόγηση (routing), όπου ζητούμενο των ερευνητών είναι η ελαχιστοποίηση και δίκαιη κατανομή της κοινωνικής διακινδύνευσης. Για να επιτευχθεί αυτό οι περισσότεροι ερευνητές επικεντρώνονται στην ανάπτυξη μοντέλων που αξιολογούν τις δυνατές διαδρομές και επιλέγουν την βέλτιστη.

Ο σχεδιασμός της μεταφοράς ΕΦ αποτελείται από τα εξής βήματα:

- a. Προσδιορισμός εναλλακτικών διαδρομών για την μεταφορά οχημάτων με ΕΦ
- b. Ποσοτικοποίηση των επιπτώσεων ατυχήματος με εμπλοκή οχήματος ΕΦ για κάθε διαδρομή
- c. Διασταυρούμενη αξιολόγηση των εναλλακτικών διαδρομών

Κατά την αξιολόγηση εναλλακτικών δρομολογίων εάν το μοντέλο εκτίμησης επικινδυνότητας επιτρέπει τον υπολογισμό δείκτη επικινδυνότητας ανά τμήμα διαδρομής, τότε μπορούν να εντοπιστούν τα τμήματα της διαδρομής με την υψηλότερη επικινδυνότητα και να επιλεγούν εναλλακτικές διαδρομές προκειμένου να μειωθεί το συνολικό ρίσκο του δρομολογίου. Εναλλακτικές διαδρομές μπορούν επίσης να επιλεγθούν προκειμένου να μειωθεί μία παράμετρος ή ένα σύνολο παραμέτρων, όπως π.χ. ο εκτεθειμένος πληθυσμός ή συγκεκριμένες ομάδες πληθυσμού(παιδιά) , ο χρόνος ταξιδιού, το κόστος μεταφοράς, κλπ.

Σε ορισμένες περιπτώσεις οι παράμετροι που λαμβάνονται υπόψη κατά τη παραγωγή του μοντέλου είναι αντιφατικές λ.χ. η μείωση του εκτεθειμένου σε κίνδυνο πληθυσμού να συνεπάγεται αύξηση του κόστους μεταφοράς ή να λαμβάνονται υπόψη οι διαφορετικές προτεραιότητες κάθε εμπλεκόμενης ομάδας που πολλές φορές είναι συγκρουόμενες π.χ. των μεταφορέων και των αρμόδιων για την ασφάλεια αρχών. Αυτό υλοποιείται με την εφαρμογή πολυπαραγοντικών μοντέλων είτε με χρήση διεπιπεδιακού γραμμικού προγραμματισμού και τη χρήση αλγορίθμων (αλγόριθμος συντομότερης διαδρομής ή ευρετικοί αλγόριθμοι) όπου για κάθε εμπλεκόμενη ομάδα γίνεται μεμονωμένη ανάλυση. Επίσης

χρησιμοποιούνται ευρετικές μέθοδοι για τον υπολογισμό συμβιβαστικής ισορροπίας μεταξύ κόστους και επικινδυνότητας (cost/risk trade-offs).

Για την εφαρμογή μεθόδων εκτίμησης επικινδυνότητας είναι απαραίτητη η διαθεσιμότητα εκτενών ιστορικών δεδομένων ατυχημάτων με την εμπλοκή οχημάτων μεταφοράς ΕΦ και των επιπτώσεων τους. Όταν μια επαρκής βάση δεδομένων δεν είναι διαθέσιμη, τότε τα μοντέλα εκτίμησης επικινδυνότητας μπορούν να εξάγουν μια ικανή πρόβλεψη στις περιπτώσεις που εφαρμόζονται υπό τις υποθέσεις που έχουν παραχθεί.

Σημειώνεται ότι για την εκτίμηση της πραγματικής επικινδυνότητας στη μεταφορά ΕΦ υπάρχουν πολλοί παράγοντες που πρέπει να ληφθούν υπόψη δηλαδή ο τύπος του επικίνδυνου φορτίου, το μέσο μεταφοράς του, ο τύπος του οχήματος, οι μετεωρολογικές και καιρικές συνθήκες, η γεωγραφική θέση της διαδρομής, η εποχή και η στιγμή της ημέρας, συνθήκες του δικτύου, καθώς και μεταβλητές που εξαρτώνται από ανθρώπινα χαρακτηριστικά (η ηλικία, η εκπαίδευση και η κατάσταση του οδηγού) και το επίπεδο του συστήματος διαχείρισης και λειτουργίας μεταφοράς. Λαμβάνοντας υπόψη τον τεράστιο αριθμό πιθανών εναλλακτικών συνδυασμών, μπορεί να ειπωθεί ότι κάθε περίπτωση μελέτης είναι ειδική και απαιτεί ειδική μεταχείριση (Kazantzi, et al., 2011).

3.3. Φαινόμενα διαρροής επικίνδυνου υλικού & σενάρια ατυχημάτων

Στην ενότητα αυτή περιγράφονται τα πιθανά φαινόμενα που εξελίσσονται όταν ένα επικίνδυνο φορτίο διαρρεύσει. Η κατανόηση της εξέλιξη του φαινομένου είναι απαραίτητη προκειμένου να είναι δυνατή η μαθηματική απεικόνιση και μοντελοποίησή του κατά την εκτίμηση της επικινδυνότητας μιας διαδρομής επικίνδυνων φορτίων. Επιπλέον αναφέρονται τα πιθανά σενάρια ατυχημάτων που οι μεθοδολογίες οδικής μεταφοράς επικίνδυνων φορτίων υιοθετούν στο αντίστοιχο στάδιο της μελέτης επικινδυνότητας.

3.3.1 Φαινόμενα διαρροής επικίνδυνου υλικού

Οι διεθνείς συμφωνίες ADR, RID, IMDG, AND, IATA DGR στα αντίστοιχα κεφάλαια ορισμών που περιέχουν, περιλαμβάνουν τον παρακάτω ορισμό της επικίνδυνης αντίδραση ουσιών. (*Chapter 1.2 "Definitions and units of measurement", ADR, RID, IMDG, AND, IATA DGR*)

«[...] Επικίνδυνη αντίδραση ουσιών είναι:

(α) η καύση ή ανάπτυξη σημαντικής θερμότητας

(β) η ανάπτυξη εύφλεκτων, ασφυξιογόνων, οξειδωτικών ή τοξικών αερίων

(γ) ο σχηματισμός διαβρωτικών ουσιών

(δ) ο σχηματισμός ασταθών ουσιών

(στ) η επικίνδυνη αύξηση πίεσης (για δεξαμενές μόνο)»

Σύμφωνα με τους (Aerde, et al., 1988), τα πιθανά φαινόμενα που συμβαίνουν κατά την διαρροή επικίνδυνου υλικού είναι:

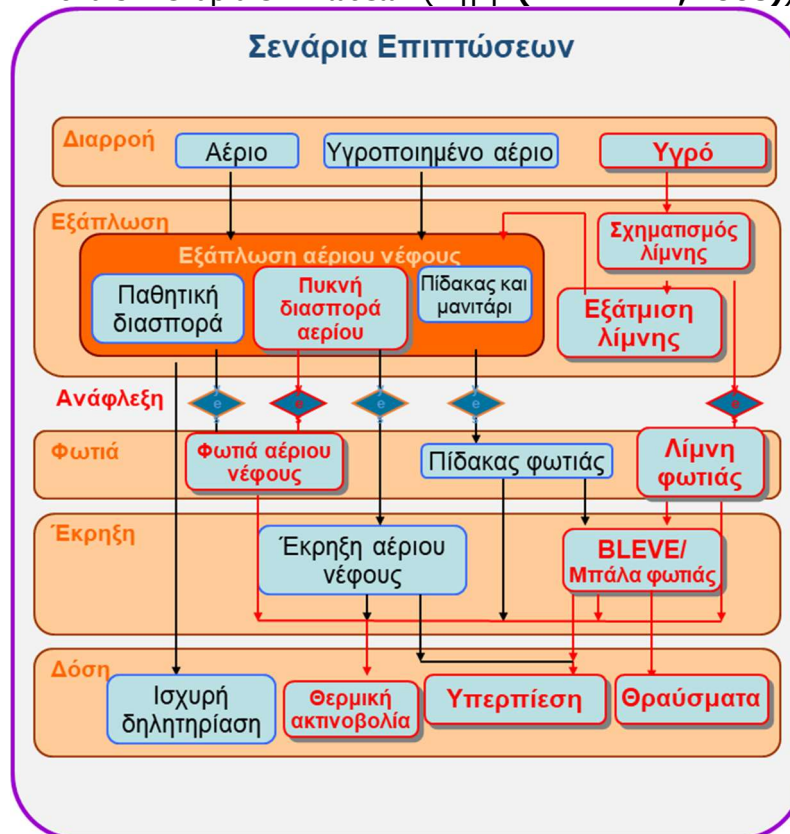
- Hot BLEVE - Έκρηξη φωτιάς από εύφλεκτο υγρό σε βρασμό. Πρόκειται για τη δημιουργία μπάλας από φωτιά εξαιτίας της έκθεσης εύφλεκτου υγρού ή υγροποιημένου αερίου σε φωτιά για αρκετή ώρα. Η φωτιά υπερθερμαίνει τη δεξαμενή που βρίσκεται το εύφλεκτο υγρό (ή υγροποιημένο αέριο) με αποτέλεσμα το υγρό (ή υγροποιημένο αέριο) να φτάνει σε σημείο βρασμού και η πίεση των ατμών μέσα στο δοχείο να μεγαλώνει, τα τοιχεία της δεξαμενής λιώνουν και ακολουθεί η έκρηξη αερίου νέφους και η δημιουργία μπάλας φωτιάς. Στην περίπτωση αυτή οι συνέπειες είναι δραματικές και εκτεταμένες τόσο σε ανθρώπινες απώλειες όσο και σε φυσικές και υλικές καταστροφές εξαιτίας της εκπομπής θερμικής ακτινοβολίας, υπερπίεσης και θανάσιμων θραυσμάτων
- Cold BLEVE- Έκρηξη αερίου νέφους. Πρόκειται για όμοιο σενάριο με το παραπάνω, όπου όμως δεν δημιουργείται η μπάλα φωτιάς. Το σενάριο αυτό μπορεί να συμβεί κατά τη μεταφορά εύφλεκτου αερίου υπό πίεση, το οποίο Εκτίθεται σε φωτιά για αρκετή ώρα και κατά την ανάφλεξη του να προκληθεί έκρηξη αερίου νέφους, με αποτέλεσμα την εκπομπή θερμικής ακτινοβολίας και υπερπίεσης. Οι συνέπειες είναι μικρότερες από την περίπτωση Hot BLEVE και συγκεντρωμένες σε υλικές ζημιές.
- Flash fire-Πίδακας Φωτιάς. Συνήθως συμβαίνει όταν καύσιμο, συνήθως εύφλεκτο αέριο έρχεται σε επαφή με ικανές συγκεντρώσεις αέρα ώστε να προκληθεί ανάφλεξη και κατόπιν ένα ταχύ- κινητό μέτωπο φωτιάς. Η καθυστερημένη ανάφλεξη διαρρέοντος αερίου είναι δυνατόν να οδηγήσει σε φωτιά αερίου νέφους. Η μορφή της φωτιάς έχει συνήθως το σχήμα του σχηματιζόμενου νέφους. Η διάρκεια αυτού του είδους φωτιάς είναι συνήθως μικρή αλλά η φλόγα μεταδίδεται με μεγάλη ταχύτητα.
- Διαρροή τοξικού αερίου: Η περίπτωση αυτή αφορά τη διαρροή μεταφερόμενου τοξικού αερίου, η οποία στην περίπτωση δυσμενών καιρικών συνθηκών και αναλόγως των ιδιοτήτων του αερίου είναι πιθανή η θανάσιμη δηλητηρίαση του εκτεθειμένου πληθυσμού.
- Λίμνη Φωτιάς-Pool fire. Δημιουργείται στην περίπτωση όπου εύφλεκτο υγρό διαρρέει και εξαπλώνεται σε σχήμα λίμνης και αναφλέγεται προκαλώντας φωτιά. Οι συνέπειες είναι πρόκληση θραυσμάτων, υπερπίεσης και θερμικής

ακτινοβολίας αναλόγως τον τρόπο που θα επεκταθεί και το σημείο που θα δημιουργηθεί .

Η (Nathanail, 2008) παρουσιάζει γραφικά τα στάδια εξέλιξης των πιθανών φαινομένων από το χρόνο της διαρροή του επικίνδυνου φορτίου έως τις πιθανές επιπτώσεις στον εκτεθειμένο πληθυσμό.

Όπως περιγράφεται στην Εικόνα 3, αφού η επικίνδυνη ουσία (αέριο, ή υγροποιημένο αέριο ή υγρό) διαρρεύσει, εξαπλώνεται είτε ως αέριο νέφος είτε σχηματίζοντας λίμνη στην περίπτωση του υγρού. Αν εξαιτίας των υπολοίπων συνθηκών η ουσία αναφλεγεί ακολουθεί φωτιά (ως φωτιά αέριου νέφους στην περίπτωση αερίου, ή ως πίδακας ή λίμνη φωτιάς στην περίπτωση υγροποιημένου αερίου ή υγρού αντίστοιχα). Μετά τη φωτιά είναι δυνατό να ακολουθήσει έκρηξη ως έκρηξη αέριου νέφους στην περίπτωση αερίου, είτε ως μπάλα φωτιάς στην περίπτωση υγρού. Οι δόσεις που ο εκτεθειμένος πληθυσμός λαμβάνει μπορεί να είναι: (i) είτε ισχυρή δηλητηρίαση από τις υψηλές συγκεντρώσεις διοξειδίου του άνθρακα και τοξικών αερίων στην περίπτωση της παθητικής διασποράς αερίου, (ii) είτε θερμική ακτινοβολία, υπερπίεση και έκθεση σε υψηλές θερμοκρασίες καπνού και θραύσματα στην περίπτωση φωτιάς και έκρηξης.

Εικόνα 3: Σενάρια επιπτώσεων (πηγή: **(NATHANAIL, 2008)**)



3.3.2 Αντιπροσωπευτικά Σενάρια ατυχημάτων κατά PIARC

Τα σενάρια αυτά χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση της επικινδυνότητας μεταφοράς HAZMAT μέσω οδικού δικτύου και προτάθηκαν από τον Παγκόσμιο Οργανισμό Οδικών δικτύων (PIARC).

Συγκεκριμένα ο PIARC έχει προσδιορίσει έντεκα σενάρια πιθανών επιπτώσεων ύστερα από ατύχημα με εμπλοκή βαρέως οχήματος που φέρει επικίνδυνο φορτίο. Επιπλέον για κάθε σενάριο, προτείνει ποσότητες εκπομπής και το μέγεθος και το ρυθμό της διαρροής. Τα έντεκα αυτά πιθανά σενάρια που παρουσιάζονται στον πίνακα 3.1. επιλέχθηκαν ως ένα αντιπροσωπευτικό σύνολο επικίνδυνων φορτίων, κοινού τύπου που μπορούν να προκαλέσουν σοβαρές απώλειες εξαιτίας ποικίλων επιπτώσεων δηλ. υπερπίεσης, θερμικής ακτινοβολίας και τοξικότητας. (Lacroix, et al., 1999)

Πίνακας 3.1: Τελικά σενάρια ατυχημάτων οχημάτων μεταφοράς επικινδύνων φορτίων
(πηγή (Lacroix, et al., 1999))

α/α	Περιγραφή	Ποσότητα	Μέγεθος διάρρηξης (mm)	Ρυθμός διαρροής (kg/s)
1	BLEVE σε φορτίο φιαλών υγραερίου	50 kg	-	
2	Λίμνη φωτιάς βενζίνης	28 tn	100	20,6
3	Έκρηξη νέφους ατμών βενζίνης	28 tn	100	20,6
4	Διαρροή χλωρίου χύδην φορτίου	20 tn	50	45
5	BLEVE φορτίου χύδην υγραερίου	18 tn	-	-
6	Έκρηξη νέφους ατμών φορτίου χύδην υγραερίου	18 tn	50	36
7	Πίδακας φωτιάς φορτίου χύδην υγραερίου	18 tn	50	36
8	Διαρροή αμμωνίας χύδην φορτίου	20 tn	50	36
9	Διαρροή ακρολεΐνης χύδην φορτίου	25 tn	100	24,8
10	Διαρροή ακρολεΐνης σε κυλίνδρους	100 lt	4	0,02
11	BLEVE διοξειδίου του άνθρακα σε χύδην φορτίο	20 tn	-	-

3.4. Οριακές τιμές οξείας έκθεσης σε χημικές ουσίες

Η έκθεση του πληθυσμού στις επικίνδυνες ουσίες και η επίδραση της στον άνθρωπο έχει συστηματοποιηθεί ποικιλοτρόπως από αρμόδιες αρχές, προκειμένου να είναι δυνατή η μέτρηση και κατηγοριοποίηση της ανάλογα με τη

σοβαρότητα και το μέγεθος της βλάβης που προκαλούν στην ανθρώπινη ζωή και υγεία. Στόχος της συστηματοποίησης αυτής είναι η καλύτερη άμεση αντιμετώπιση ατυχημάτων που διαφεύγει επικίνδυνη ουσία απειλώντας ανθρώπινο πληθυσμό.

Τα συστήματα αυτά οριακών τιμών έκθεσης σε χημικές ουσίες διαχωρίζονται σε δύο κατηγορίες, αυτά που αφορούν στα επίπεδα *μακροχρόνιας έκθεσης σε χημικές ουσίες* και σχετίζονται με επικίνδυνο εργασιακό περιβάλλον και στα επίπεδα *οξείας ή σπάνιας έκθεσης σε χημικές ουσίες* και σχετίζονται με τις περιπτώσεις ατυχημάτων διαφυγής επικίνδυνων ουσιών που μπορεί ένας πληθυσμός να βιώσει.

Αμέσως παρακάτω παρουσιάζονται τα σημαντικότερα συστήματα οριακών τιμών σπάνιας έκθεσης σε χημικές ουσίες (Acute Exposure Values) που αναπτύχθηκαν από διαφορετικές αρχές σε παγκόσμιο επίπεδο, τα οποία εφαρμόζουν οι αρμόδιες αρχές της Ευρωπαϊκής Ένωσης στα πλαίσια της Ευρωπαϊκής οδηγίας 2012/18/ΕΕ Seveso III (Οδηγία για την αντιμετώπιση των κινδύνων μεγάλων ατυχημάτων σχετιζόμενων με επικίνδυνες ουσίες).

1. Κατευθυντήρια επίπεδα Οξείας Έκθεσης (**Acute Exposure Guideline Levels- AEGL**). Αναπτύχθηκαν από την εθνική συμβουλευτική επιτροπή της διεύθυνσης περιβαλλοντικής προστασίας των ΗΠΑ (National Advisory Committee, USEPA). (National Advisory Committee & USEPA, 2001) Περιλαμβάνει τρία επίπεδα:

AEGL -1: για τιμή συγκέντρωσης σωματιδίων ((ppm ή mg / m³) της επικίνδυνης ουσίας πάνω από την οποία, προβλέπεται ότι ο γενικός πληθυσμός συμπεριλαμβανομένων των ευπαθών ατόμων, θα μπορούσαν να βιώσουν αξιοσημείωτη δυσφορία, ερεθισμό ή κάποιες ασυμπτωτικές μη αισθητήριες επιδράσεις. Παρόλ' αυτά οι επιδράσεις παραμένουν και είναι παροδικές και αναστρέψιμες με την παύση της έκθεσης.

AEGL -2: για τιμή συγκέντρωσης σωματιδίων (ppm ή mg / m³) μιας ουσίας πάνω από την οποία προβλέπεται ότι ο γενικός πληθυσμός, συμπεριλαμβανομένων των ευπαθών ατόμων, θα μπορούσε να παρουσιάσει μη αναστρέψιμες ή άλλες σοβαρές μακροχρόνιες δυσμενείς επιπτώσεις στην υγεία ή μειωμένη ικανότητα να ξεφύγουν

AEGL -3: για τιμή συγκέντρωσης σωματιδίων (ppm ή mg / m³) σε μια ουσία πάνω από την οποία αναμένεται ότι ο γενικός πληθυσμός, συμπεριλαμβανομένων των ευπαθών ατόμων, θα μπορούσε να βιώνει απειλητικές για τη ζωή και την υγεία επιπτώσεις ή θάνατο.

2. Κατευθυντήριες οδηγίες για τον σχεδιασμό δράσης έκτακτης ανάγκης (**Emergency Response Planning Guidelines ERPG**) της Ένωσης

Βιομηχανικής Υγιεινής των ΗΠΑ (American Industrial Hygiene Association). (ΑΙΗΑ, 2020). Περιλαμβάνει τρία επίπεδα:

ERPG-1 είναι η μέγιστη συγκέντρωση σωματιδίων κάτω από την οποία σχεδόν όλα τα άτομα θα μπορούσαν να εκτεθούν έως και μία ώρα χωρίς να εμφανίζουν περισσότερο από ήπιες, παροδικές δυσμενείς επιπτώσεις στην υγεία ή χωρίς να αντιλαμβάνονται μια σαφώς καθορισμένη δυσάρεστη οσμή.

ERPG-2 είναι η μέγιστη συγκέντρωση σωματιδίων κάτω από την οποία σχεδόν όλα τα άτομα θα μπορούσαν να εκτεθούν έως και μία ώρα χωρίς να εμφανίζουν ή να αναπτύσσουν μη αναστρέψιμες ή άλλες σοβαρές επιπτώσεις στην υγεία ή συμπτώματα που θα μπορούσαν να βλάψουν την ικανότητα ενός ατόμου να αναλάβει προστατευτική δράση.

ERPG-3 είναι η μέγιστη συγκέντρωση σωματιδίων, κάτω από την οποία σχεδόν όλα τα άτομα θα μπορούσαν να εκτεθούν έως και μία ώρα χωρίς να βιώνουν ή να αναπτύσσουν απειλητικές για τη ζωή επιπτώσεις στην υγεία.

3. Επίπεδα συγκέντρωσης Άμεσου Κινδύνου για τη Ζωή και την Υγεία (**Immediately Dangerous to Life and Health IDLH**) που αναπτύχθηκαν από το Εθνικό Κέντρο Για την Επαγγελματική Ασφάλεια και Υγεία των ΗΠΑ (National Institute for Occupational Health and Safety). Οι τιμές αυτές αφορούν την μακροχρόνια έκθεση εργαζομένων και η οριακή επιτρεπόμενη τιμή σε έκθεση δίνεται για κάθε επικίνδυνη ουσία. (NIOSH, 1994)

4. Δείκτες Έκθεσης Έκτακτης Ανάγκης (**Emergency Exposure Indices EEI**) του Ευρωπαϊκού Κέντρου Οικοτοξικολογίας και Τοξικολογίας των Χημικών Προϊόντων (European Centre for Ecotoxicology and Toxicology of Chemicals –ECETOC). Περιλαμβάνει τρία επίπεδα (ECETOC, 1991)

EEI-1: είναι η μέγιστη συγκέντρωση σωματιδίων, κάτω από την οποία ο εκτεθειμένος πληθυσμός δεν αναμένεται να εμφανίσει δυσφορία.

EEI-2: είναι η μέγιστη συγκέντρωση σωματιδίων, κάτω από την οποία ο εκτεθειμένος πληθυσμός δεν αναμένεται να εμφανίσει ερεθισμό.

EEI-3: είναι η μέγιστη συγκέντρωση σωματιδίων, κάτω από την οποία ο εκτεθειμένος πληθυσμός δεν αναμένεται να παρουσιάσει ανικανότητα.

5. Προσωρινά επίπεδα έκθεσης έκτακτης ανάγκης (**Temporary Emergency Exposure Levels TEEL**) του Υπουργείου Ενέργειας των ΗΠΑ. (SCAPA, n.d.)

Το TEEL-3 είναι η συγκέντρωση σε ppm σωματιδίων μιας ουσίας πάνω από την οποία προβλέπεται ότι ο γενικός πληθυσμός, συμπεριλαμβανομένων των ευπαθών ατόμων, όταν εκτίθεται για περισσότερα από μια ώρα, θα μπορούσε

να βιώσει επιβλαβείς για τη ζωή και αρνητικές συνέπειες για την υγεία ή το θάνατο.

Το TEEL-2 είναι η συγκέντρωση σωματιδίων σε μια ουσία (εκφραζόμενη σε ppm ή mg / m³) πάνω από την οποία προβλέπεται ότι ο γενικός πληθυσμός, συμπεριλαμβανομένων των ευπαθών ατόμων, όταν εκτίθεται για περισσότερο από μία ώρα, μπορεί να παρουσιάσει μη αναστρέψιμες ή άλλες σοβαρές, διαρκείς, δυσμενείς επιπτώσεις στην υγεία ή μειωμένη ικανότητα διαφυγής.

Το TEEL-1 είναι η συγκέντρωση σωματιδίων (εκφρασμένη σε ppm ή mg / m³) μιας ουσίας πάνω από την οποία προβλέπεται ότι ο γενικός πληθυσμός, συμπεριλαμβανομένων των ευπαθών ατόμων, όταν εκτίθεται περισσότερο από μία ώρα, μπορεί να παρουσιάσει αξιοσημείωτη ενόχληση, ερεθισμό ή ορισμένες ασυμπτωματικές, αναιτιολόγητες επιδράσεις. Ωστόσο, αυτά τα αποτελέσματα παραμένουν και είναι παροδικά και αναστρέψιμα μετά την παύση της έκθεσης.

6. Κατώτατα επίπεδα θανάσιμων επιπτώσεων και κατώτατα επίπεδα μη αναστρέψιμων επιπτώσεων **SEL** και **SEI(Threshold of Lethal Effects and Threshold of Irreversible Effects)** του Υπουργείου Περιβάλλοντος της Γαλλίας, των INERIS, INRS, IPSN , των πανεπιστημιακών νοσοκομείων και της βιομηχανίας (INERIS, et al., n.d.)

Τα «κατώτατα όρια θανατηφόρων επιδράσεων» (SEL) αντιστοιχούν σε τιμή συγκέντρωσης αεροσωματιδίων πάνω από την οποία αναμένεται θνησιμότητα στον εκτεθειμένο για δεδομένη διάρκεια πληθυσμό.

Τα «κατώτατα όρια μη αναστρέψιμων επιδράσεων» (SEI): αντιστοιχούν σε τιμή συγκέντρωσης αεροσωματιδίων πάνω από την οποία μπορεί να εμφανιστούν μη αναστρέψιμες επιδράσεις στον εκτεθειμένο για δεδομένη διάρκεια πληθυσμό.

Τα «κατώτατα όρια αναστρέψιμων επιδράσεων (SER): αντιστοιχούν σε τιμή συγκέντρωσης αεροσωματιδίων πάνω από την οποία μπορεί να εμφανιστούν αναστρέψιμες επιδράσεις στον εκτεθειμένο πληθυσμό.

Τα «κατώτατα όρια αντιληπτών επιδράσεων» (SP): αντιστοιχούν σε τιμή συγκέντρωσης αεροσωματιδίων που οδηγεί σε αισθητή ανίχνευση της χημικής ουσίας από τον εκτεθειμένο πληθυσμό (συχνότερα μέσω οσφρητικής ανίχνευσης).

7. Ολλανδικές παρεμβατικές οδηγίες (**Dutch Intervention Guidelines, 1999**) (RIVM, 1999)

Τιμή απειλητική για την ζωή LBW(Levensbedreigende waarde): η συγκέντρωση μιας ουσίας πάνω από την οποία μπορεί να αναπτυχθεί θάνατος ή απειλητική για τη ζωή κατάσταση εντός ολίγων ημερών μετά από έκθεση μιας ώρας.

Ανησυχητικά όρια (Alarmeringsgrenswaarde-AGW): η συγκέντρωση μιας ουσίας πάνω από την οποία μη αναστρέψιμη ή άλλη σοβαρή βλάβη της υγείας μπορεί να προκύψει ως αποτέλεσμα οξέων τοξικών επιδράσεων μετά από έκθεση μιας ώρας.

Κατευθυντήρια τιμή επικοινωνίας (Voorlichtingsrichtwaarde-VRW): η τιμή συγκέντρωσης μιας ουσίας για την οποία στην πλειοψηφία του πληθυσμού θα γίνει αντιληπτό ως εμπόδιο ή πάνω από την οποία μικρές, γρήγορα αναστρέψιμες επιδράσεις στην υγεία μπορεί να συμβούν μετά από μία έκθεση μιας ώρας.

8. Επικίνδυνα τοξικά φορτία (**Dangerous Toxic Load -DTL**) του υπουργείου Υγείας και Ασφάλειας του Ηνωμένου Βασιλείου : (HSE, 2017)

Καθορισμένο επίπεδο τοξικότητας - SLOT: το επίπεδο συγκέντρωσης αεροσωματιδίων στο οποίο σχεδόν όλοι εντός της εκτιθέμενης περιοχής είναι πιθανό να υποφέρουν από έντονη δυσφορία, με ένα σημαντικό ποσοστό αυτής να χρειαστεί ιατρική βοήθεια και μερικοί άνθρωποι θα τραυματιστούν σοβαρά απαιτώντας παρατεταμένη θεραπεία. Για πολύ ευάλωτα άτομα, υπάρχει η πιθανότητα να σκοτωθούν.

Σημαντική πιθανότητα θνησιμότητας -SLOD: το επίπεδο συγκέντρωσης αεροσωματιδίων στο οποίο αναμένεται θνησιμότητα του 50% του εκτεθειμένου πληθυσμού.

9. Επίπεδα οξείας Έκθεσης -**AETL** του Ευρωπαϊκού ερευνητικού προγράμματος ACUTEX: (ACUTEX, 2006)

Acute Exposure Threshold Level-3a: η τιμή συγκέντρωσης για την οποία αναμένεται ότι μετά από συγκεκριμένο χρόνο έκθεσης το 50% του γενικού πληθυσμού θα σκοτωθεί.

Acute Exposure Threshold Level-3b: η τιμή συγκέντρωσης για την οποία αναμένεται ότι ο γενικός πληθυσμός δεν θα αντιμετωπίσει απειλή ή απώλεια της ζωής του.

Acute Exposure Threshold Level-2 η τιμή συγκέντρωσης για την οποία αναμένεται ότι ο γενικός πληθυσμός δεν θα αντιμετωπίσει ή αναπτύξει μη αναστρέψιμες ή άλλες βλάβες ή συμπτώματα που μπορεί να οδηγήσει σε βλάβη.

Acute Exposure Threshold Level-1 η μέγιστη τιμή συγκέντρωσης αεροσωματιδίων για την οποία αν ο γενικός πληθυσμός εκτεθεί για συγκεκριμένο χρόνο δεν θα υποφέρει περισσότερο από μια ήπια και αναστρέψιμη δυσμενή επίπτωση στην υγεία.

Από τα παραπάνω συστήματα επιπέδων έκθεσης σε επικίνδυνες ουσίες, τα AEGLs, ERPGs, TEELs είναι πιο δημοφιλή σε χρήση αφού ενσωματώνονται ως επιλογή στα υποστηρικτικά λογισμικά υπολογισμού επιπτώσεων από ατυχήματα διαφυγής επικίνδυνων χημικών ουσιών, (λ.χ. στα λογισμικά ADAM, ALOHA, βλέπε ενότητα 3.5).

3.5. Λογισμικά προσομοίωσης και υπολογισμού επιπτώσεων ατυχημάτων από διαρροή επικίνδυνης ουσίας

Στις μεθοδολογίες εκτίμησης επικινδυνότητας συχνά χρησιμοποιούνται λογισμικά που προσομοιώνουν τα φαινόμενα που ακολουθούν τη διαρροή επικίνδυνης ουσίας (βλέπε ενότητα 3.2) κατά τον υπολογισμό των ζωνών επίδρασης των ατυχημάτων. Στην ενότητα αυτή περιγράφονται ενδεικτικά τα λογισμικά ADAM (Accident Damage Analysis Module) και ALOHA (Areal Locations of Hazardous Atmospheres), δεδομένου ότι έχουν αναπτυχθεί από σχετικά επίσημους φορείς της Ευρωπαϊκής Επιτροπής και του διεύθυνσης EPA των ΗΠΑ αντίστοιχα.

3.5.1. Λογισμικό ADAM (Accident Damage Analysis Module)

Το λογισμικό ADAM (Accident Damage Analysis Module) αναπτύχθηκε από το Ενιαίο Κέντρο Ερευνών (Joint Research Center -JRC) της Ευρωπαϊκής Επιτροπής, καθώς προορίζεται για να βοηθήσει τις αρμόδιες αρχές της ΕΕ, οι οποίες είναι υπεύθυνες για την εφαρμογή της οδηγίας Seveso III (Οδηγία 2012/18/EU) στις χώρες τους, καθώς και κυβερνητικούς και ερευνητικούς οργανισμούς των κρατών μελών της ΕΕ.

Ειδικότερα, το ADAM έχει σχεδιαστεί για τον υπολογισμό των φυσικών επιπτώσεων ενός βιομηχανικού ατυχήματος, από την άποψη της θερμικής ακτινοβολίας, της υπερπίεσης ή της τοξικής συγκέντρωσης που μπορεί να προκύψει από διαρροή μιας εύφλεκτης ή τοξικής ουσίας. Για το σκοπό αυτό, έχουν χρησιμοποιηθεί και συνδυαστεί κατάλληλα μοντέλα για την προσομοίωση

της πιθανής εξέλιξης ενός ατυχήματος από τη στιγμή της απελευθέρωσης μέχρι την τελική βλάβη. Η συνολική δομή αυτού του εργαλείου αποτελείται από τρεις αλληλοσυνδεόμενες ενότητες: Πηγή (Ενότητα 1), Φυσικές Επιδράσεις (Ενότητα 2) και τρωτότητα (Ενότητα 3).

Η πρώτη ενότητα αναφέρεται στην εκτίμηση της ποσότητας της ουσίας που απελευθερώνεται κατά το συμβάν. Αυτός ο υπολογισμός απαιτεί τη γνώση του τύπου και της ποσότητας της ουσίας που εμπλέκεται στο ατύχημα, των φυσικών συνθηκών και των συνθηκών αποθήκευσης, του τύπου και του τρόπου θραύσης και του χρόνου απελευθέρωσης. Κάθε ουσία χαρακτηρίζεται από ειδικές θερμοδυναμικές, μηχανικές και μεταφορικές ιδιότητες, οι οποίες μπορεί να επηρεάσουν σημαντικά τη συμπεριφορά απελευθέρωσης, όπως την ταχύτητα διαφυγής, το ρυθμό διαρροής, το ρυθμό εξάτμισης και γενικά τη συμπεριφορά ροής προκειμένου να προσομοιωθεί η εξέλιξη του φαινομένου.

Η δεύτερη ενότητα χρησιμοποιεί το αποτέλεσμα της ενότητας 1 για την εκτίμηση των φυσικών επιπτώσεων του ατυχήματος διαρροής. Ο υπολογισμός των φυσικών επιδράσεων εξαρτάται από τον τύπο του ατυχήματος και μπορεί να είναι: (i) η θερμική ακτινοβολία που παράγεται από πυρκαγιά λόγω της ανάφλεξης εύφλεκτου υγρού ή ατμού, (ii) η υπερπίεση που παράγεται από την έκρηξη ενός νέφους ατμού που αναφλέγεται (iii) η διάδοση του τοξικού νέφους στην ατμόσφαιρα. Οι υπολογισμοί αυτοί επηρεάζονται κανονικά από τις ατμοσφαιρικές συνθήκες (δηλ. Θερμοκρασία αέρα, σταθερότητα αέρα, ταχύτητα ανέμου) και από άλλες παραμέτρους όπως ο μέσος χρόνος διασποράς ατμών ή χρόνος ανάφλεξης ή ανάφλεξης για πυρκαγιές και εκρήξεις ατμών. Επί του παρόντος, το πεδίο εφαρμογής του ADAM αφορά τις συνέπειες των επιπτώσεων στον άνθρωπο. Άλλα αποτελέσματα, όπως οι χρόνιες επιπτώσεις που συνδέονται με τη ρύπανση δεν περιλαμβάνονται στο πεδίο εφαρμογής του ADAM. Το αποτέλεσμα της ενότητας Φυσικού Επιπέδου αποτελείται από: (i) 2D Χάρτη (ii) ισογραμμές. Ο 2D-χάρτη ή οι ισογραμμές που παράγονται μπορεί να μετατραπούν σε αρχεία με γεωγραφική αναφορά (δηλ. GPX, KML).

Η τρίτη ενότητα έχει σχεδιαστεί για να αντιμετωπίσει την τρωτότητα δηλαδή το επίπεδο βλάβης που προκαλείται από τις φυσικές επιδράσεις, οι οποίες είναι το αποτέλεσμα της ενότητας 2. Αυτό εξαρτάται από την ένταση και τη διάρκεια της έκθεσης στην φυσική επίδραση, το οποίο μπορεί να εκφραστεί ως λαμβανόμενη δόση. Συγκεκριμένα, η δόση εκτιμάται ως το γινόμενο της έντασης I της έκθεσης (σε συγκεκριμένο εκθέτη n) και της διάρκειας έκθεσης t , δηλαδή ίση με $I^n \cdot t$. Στο λογισμικό ADAM, η τρωτότητα εκτιμάται κυρίως με βάση την πιθανότητα θανάτου ενός ατόμου ή μιας ομάδας ατόμων ως συνέπεια της ληφθείσας δόσης. Ως εκ τούτου η μέθοδος log-probit έχει επιλεγεί ως η πιο απλή και ευθύς προσέγγιση για να περιγράψει την κατανομή της ανθρώπινης τρωτότητας. Προκειμένου να

εκφραστεί η θνησιμότητα για κάθε τύπο ατυχήματος, χρησιμοποιούνται ειδικά probits τρωτότητας για κάθε μία από τις ακόλουθες περιπτώσεις έκθεσης: πυρκαγιά, έκρηξη και εισπνοή τοξικών. Εκτός από την προσέγγιση probit, το λογισμικό ADAM παρέχει τη δυνατότητα έκφρασης του επιπέδου βλάβης, χρησιμοποιώντας σχετικά επίπεδα συγκέντρωσης ουσιών που επιφέρουν επιπτώσεις στον εκτιθέμενο πληθυσμό όπως (π.χ. AEGLs, ERPGs και TEELs). (JRC, 2017)

3.5.2. Λογισμικό ALOHA (Areal Locations of Hazardous Atmospheres)

Το λογισμικό ALOHA έχει αναπτυχθεί από τη Διεύθυνση Προστασίας Περιβάλλοντος των ΗΠΑ (United States Environmental Protection Agency) και την Εθνική Αρχή Ωκεανών και Ατμόσφαιρας των ΗΠΑ (National Oceanic and Atmospheric Administration ,NOAA). Είναι ευρέως γνωστό λογισμικό δεδομένου ότι επιλύει μια σειρά σεναρίων διαρροής, έκρηξης ή εξάπλωσης επικίνδυνων ουσιών, όπως έκρηξη φωτιάς από εύφλεκτο υγρό (hot BLEVE) έκρηξη αέριων ατμών (cold BLEBE) εξάπλωση σύννεφων τοξικών αερίων, πίδακες φωτιάς, φωτιά- λίμνη κ.α.

Στην συνέχεια αξιολογεί τα διαφορετικά είδη κινδύνου (ανάλογα με το σενάριο διασποράς): τοξικότητα, ευφλεκτότητα, θερμική ακτινοβολία, υπερπίεση και μοντελοποιεί την διασπορά των χημικών διαρροών.

Επιπλέον υπολογίζει το ρυθμό διαρροής των χημικών από τη δεξαμενή και προβλέπει πώς ο ρυθμός διαρροής αλλάζει με το χρόνο.

Τέλος υπολογίζει την απειλούμενη περιοχή (ακτίνα ζώνης) εξαιτίας της διαρροή των επικίνδυνων ουσιών για κάθε σενάριο και παράγει σχετικά γραφήματα.

4. Μεθοδολογίες Εκτίμησης Επικινδυνότητας στις Σιδηροδρομικές, Οδικές και Πολυτροπικές Μεταφορές HAZMAT

Όπως εισαγωγικά αναφέρθηκε, η παγκόσμια τάση στην χερσαία μεταφορά των επικίνδυνων φορτίων είναι η πλήρης αξιοποίηση των ισχυρών πλεονεκτημάτων που προσφέρει ο σιδηρόδρομος. Ιδιαίτερη άνθιση παρουσιάζει ο συνδυασμός των δυο μέσων με κυρίαρχο τον σιδηρόδρομο (rail intermodal), όπου το φορτίο μεταφέρεται οδικά από τον τόπο παραγωγής του σε κεντρικούς εμπορευματικούς σιδηροδρομικούς σταθμούς και μεταφέρεται σιδηροδρομικά διανύοντας μεγάλες αποστάσεις έως τον τερματικό σταθμό από όπου παραλαμβάνεται και καταλήγει οδικά στον τόπο ζήτησής του. Σημειώνεται ότι ήδη στη βόρεια Αμερική κάθε χρόνο μεταφέρονται περίπου 2,3 εκατ. επικίνδυνα φορτία βαγονιού(carloads) μέσω του rail intermodal (AAR, 2018) .

Ακολουθώντας την τάση αυτή, η παρούσα διπλωματική εργασία μελετά την σιδηροδρομική, την οδική και την συνδυασμένη μεταφορά των επικίνδυνων φορτίων, εστιάζοντας στο σιδηρόδρομο ως κυρίαρχο χερσαίο μέσο στην μεταφορά των επικίνδυνων φορτίων.

Συγκεκριμένα στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται μεθοδολογίες εκτίμησης της επικινδυνότητας κατά την μεταφορά επικίνδυνων φορτίων μέσω (i) του σιδηροδρομικού δικτύου στην ενότητα 4.1, 4.2 και 4.3 (ii) του οδικού δικτύου ενότητα 4.4 (iii) και πολυτροπικά δηλαδή συνδυάζοντας το σιδηροδρομικό και οδικό δίκτυο στην ενότητα 4.5.

Σημειώνεται ότι οι μεθοδολογίες που έχουν περιληφθεί στο παρόν κεφάλαιο αποτελούν τις πρόσφατες προτάσεις ερευνητών του ακαδημαϊκού κόσμου, όπως έχουν δημοσιευθεί στη διεθνή βιβλιογραφία από το 2015 έως σήμερα, χωρίς να έχουν παραληφθεί παλιότερες αξιόλογες δημοσιεύσεις που αποτελούν ολοκληρωμένη πρόταση και για το λόγο αυτό υιοθετούνται από πληθώρα επόμενων ερευνών.

Αρχικά παρουσιάζονται οι σημαντικότερες διαφορές μεταξύ της χρήσης του σιδηρόδρομου και των οδικών οχημάτων στην μεταφορά των επικίνδυνων φορτίων εξαιτίας της διαφορετικότητας και των χαρακτηριστικών των δύο μέσων:

- ο Στην περίπτωση της σιδηροδρομικής μεταφοράς ΕΦ, η αμαξοστοιχία συνήθως μεταφέρει μη επικίνδυνα και επικίνδυνα φορτία ταυτόχρονα, ενώ στην περίπτωση των βαρέων οχημάτων τα φορτία δεν αναμειγνύονται.

- ο Ένα βυτιοφόρο βαγόνι μιας εμπορευματικής αμαξοστοιχίας έχει έως και τριπλάσια χωρητικότητα από ένα βυτιοφόρο όχημα (40-90tn και 25-30tn αντίστοιχα) καθώς επίσης ο αριθμός των βαγονιών με ΕΦ ποικίλει μεταξύ διαφορετικών τραίνων. Η δυνατότητα αυτή μεταβολής της συνολικής ποσότητας ΕΦ που μεταφέρει τελικά ένα εμπορευματικό τρένο πρέπει να λαμβάνεται υπόψη ως παράγοντας στην εκτίμηση της επικινδυνότητας.
- ο Η δυνατότητα μεταφοράς μέσω του σιδηροδρόμου μεγαλύτερων ποσοτήτων ΕΦ αυξάνει και την επίπτωση ενός πιθανού ατυχήματος και τη δριμύτητα των επιπτώσεων αυτών.
- ο Η σιδηροδρομική μεταφορά ΕΦ συνήθως δεν προσφέρει ευελιξία στην επιλογή εναλλακτικής διαδρομής σε σχέση με την οδική μεταφορά ΕΦ και τη χρήση οδικού δικτύου.

4.1 Κεντρική μεθοδολογία εκτίμησης επικινδυνότητας κατά την σιδηροδρομική μεταφορά επικίνδυνων φορτίων.

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζεται η κεντρική μεθοδολογία εκτίμησης της επικινδυνότητας κατά την μεταφορά HAZMAT μέσω σιδηροδρόμου, όπως προέκυψε από μια διευρυμένη βιβλιογραφική έρευνα δημοσιευμένων προτάσεων. Σημειώνεται ότι η εν λόγω μεθοδολογία αποτελεί προσαρμογή στο σιδηροδρομικό δίκτυο της μεθόδου υπολογισμού της κοινωνικής διακινδύνευσης όπως προτάθηκε από τους (Saccomanno, et al., 1990). Η παρούσα κεντρική μεθοδολογία παρουσιάστηκε από τους (Verma, 2011) και (Verma & Verter, 2007) και υιοθετήθηκε από επόμενες ερευνητικές προτάσεις, όπως αναφέρεται στις ενότητες 4.2,4.3.

Η κεντρική μεθοδολογία παρουσιάζεται ανά στάδιο μελέτης εκτίμησης επικινδυνότητας (όπως τα στάδια έχουν περιγραφεί στην ενότητα 3.2) ενσωματώνοντας σχετικές αναφορές, έρευνες, μελέτες και προτάσεις της διεθνούς βιβλιογραφίας.

4.1.1 Ανάλυση ιστορικών στοιχείων σιδηροδρομικών ατυχημάτων

Η ανάλυση των πληροφοριών και των στοιχείων των ατυχημάτων που έχουν ήδη καταγραφεί, όταν τα στοιχεία αυτά είναι διαθέσιμα, μπορεί να παράξει πολύ χρήσιμα συμπεράσματα και πληροφορίες για την εκτίμηση της επικινδυνότητας κατά την μεταφορά επικίνδυνων φορτίων. Επιπλέον η στατιστική ανάλυση των

στοιχείων αυτών αποτελεί βασικό στοιχείο για τον σχεδιασμό μοντέλων εκτίμησης επικινδυνότητας.

1. Προς αυτήν την κατεύθυνση η (Verma, 2011) μελέτησε περίπου 25.000 περιστατικά εκτροχιασμού εμπορευματικών τρενών στις ΗΠΑ, χρησιμοποιώντας ως πηγή τα ιστορικά δεδομένα της Ομοσπονδιακής Σιδηροδρομικής Διοίκησης του Υπουργείου Μεταφορών (Federal Railroad Administration –FRA, 2010) για τα έτη 1995 έως τον Ιούλιο του 2009. Σύμφωνα με την ανάλυση αυτή, οι βασικές αιτίες στις οποίες οφείλονται τα ατυχήματα είναι : (i) ο ανθρώπινος παράγοντας (κατά 39%) (ii) η αστοχία επιδομής, (στρωτήρων, ραγών, αλλαγών κλπ.) (κατά 30%). Ακολουθούν (iii) ηλεκτρομηχανολογικές αστοχίες (κατά 10%) (iv) σφάλματα συστήματος σηματοδότησης ή τηλεπικοινωνιών(σε 2%) ενώ υπάρχει σε αυξημένο ποσοστό (19%) η κατηγορία (v) διάφορα. Η συνολική επίδραση και των πέντε αιτιών απεικονίζεται σε ένα σύνθετο συντελεστή, το δείκτη ατυχημάτων (accident rate) που ισούται με τον αριθμό ατυχημάτων ανά εκατομμύρια διανυόμενα μίλια.

Μάλιστα η FRA δημοσιεύει τα ποσοστά ατυχήματος ανάλογα με το τμήμα της επιδομής (δηλαδή ποσοστό ατυχημάτων στην κύρια γραμμή ή σε σταθμούς μεταφόρτωσης). Σύμφωνα με τα στοιχεία των ετών από 1995 έως 2009 της FRA το ποσοστό ατυχήματος είναι το μικρότερο στις κύριες γραμμές και το μεγαλύτερο στους σταθμούς μεταφόρτωσης.

Ένα πρόσθετο στοιχείο που προκύπτει από την ανάλυση των δεδομένων είναι ότι η πιθανότητα εκτροχιασμού βαγονιού ανάλογα με τη θέση του είναι διαφορετική και εξαρτάται από το μήκος του τρενιού. Συγκεκριμένα σύμφωνα με μελέτη της FRA που περιλάμβανε την ανάλυση 165.000 εκτροχιασμένων βαγονιών, προκύπτει το συμπέρασμα ότι οι πιθανότητες εκτροχιασμού είναι υψηλότερες στο πρώτο (μπροστινό) τέταρτο του τρενιού και χαμηλότερες στο τελευταίο. Η (Verma, 2011) υιοθετώντας τις υποδεκάδες (δηλαδή τη διαίρεση του τρενιού σε δέκα ίσα μέρη) στη στατιστική ανάλυση των 25.000 καταγεγραμμένων περιστατικών εκτροχιασμού που διέθετε, και για τις τρεις κατηγορίες μήκους τρενιού κατά Bagheri (2009) [όπου τα εμπορευματικά τρένα με έως 40 βαγόνια καταχωρούνται ως κοντά τρένα, με από 41 έως 120 βαγόνια, ως ενδιάμεσα τρένα και από 121 και άνω ως μακριά τρένα] συμπέρανε ότι: (i) η 1^η υποδεκάδα έχει την μεγαλύτερη πιθανότητα εκτροχιασμού, (ii) το μισό μπροστινό τμήμα του τρενιού είναι πιο επικίνδυνο (iii) η 7^η υποδεκάδα είναι η πιο ασφαλής για τοποθέτηση βαγονιών μεταφοράς ΕΦ σε τρένα με λιγότερα των 121 βαγονιών και η 8^η υποδεκάδα για μακρύτερα τρένα, (iv) τα κοντά και μεσαία τρένα αποτελούν το 93% του δυναμικού εμπορευματικών αμαξοστοιχιών, (v) συμπερασματικά τοποθετώντας τα βαγόνια HAZMAT μεταξύ 6^{ης} και 9^{ης} υποδεκάδας μειώνεται ο κίνδυνος εκτροχιασμού των βαγονιών αυτών, (vi) το

98% των εκτροχιασμών τρενών δεν οδήγησε σε διαρροή ΕΦ, ενώ από το υπολειπόμενο 2% (493 εκτροχιασμένα τρένα) διέρρευσαν από ένα έως είκοσι βαγόνια HAZMAT, με εκατόν είκοσι περιπτώσεις διαρροής πολλαπλών βαγονιών.

2. Μια ακόμα στατιστική ανάλυση δεδομένων σιδηροδρομικών ατυχημάτων (Barkan, et al., 2003) έδειξε ότι η πιθανότητα διαρροής επικίνδυνου φορτίου συσχετίζονται έντονα με την ταχύτητα του τρένου κατά τον εκτροχιασμό και τον αριθμό εκτροχιασμένων βαγονιών. Παρομοίως από τους (Fang, et al., 2017) σε στατιστική ανάλυση 5.476 αναφορών σιδηροδρομικών εκτροχιασμών περιόδου 1999-2019 στις ΗΠΑ που διεξήγαγαν, προέκυψε ότι η ταχύτητα και το μήκος του τρένου καθώς και η βροχή και το χιόνι έχουν μεγάλη συσχέτιση με τον αριθμό εκτροχιασμένων βαγονιών, και όχι η μη ύπαρξη καλής ορατότητας (ομίχλη, σούρουπο ,νύχτα)

3. Επίσης πολλές έρευνες επικεντρώνονται στον τύπο και την τεχνολογία κατασκευής βαγονιών που μειώνουν την πιθανότητα διαρροής στην περίπτωση εκτροχιασμού του. Οι (Raj & Pritchard, 2000) κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι τα βυτιοφόρα βαγόνια τύπου DOT-105 είναι ασφαλέστερα από αυτά τύπου DOT - 111, ενώ οι (Barkan, et al., 2000) απέδειξαν ότι τα βαγόνια δεξαμενές που διαθέτουν εξοπλισμό μείωσης πίεσης παρουσιάζουν μικρότερο δείκτη διαρροής της περιεχόμενης ουσίας τους από αυτά που δεν έχουν σχετικά εξοπλισμό.

4.1.2 Εκτίμηση πιθανότητας ατυχήματος με εμπλοκή οχήματος που μεταφέρει επικίνδυνα φορτία και διαρροής ΕΦ

1. Ζητούμενο είναι ο προσδιορισμός της πιθανότητας μια αμαξοστοιχία που περιλαμβάνει βαγόνια με επικίνδυνα φορτία, να εμπλακεί σε ατύχημα το οποίο θα προκαλέσει εκτροχιασμό βαγονιών, το οποίο θα προκαλέσει εκτροχιασμό βαγονιών HAZMAT και στη συνέχεια τα επικίνδυνα φορτία τους να διαρρεύσουν. Πρόκειται λοιπόν για ένα αλυσιδωτό περιστατικό το οποίο αποτελείται από τέσσερα σκέλη: (i) εμπλοκή της εμπορευματικής αμαξοστοιχίας σε ατύχημα (ii) εκτροχιασμός βαγονιών (iii) εκτροχιασμό βαγονιών HAZMAT (iv) διαρροή επικίνδυνων φορτίων. Είναι προφανές ότι μόνο η πιθανότητα του πρώτου σκέλους είναι ανεξάρτητη, ενώ οι πιθανότητες του δεύτερου του τρίτου και του τέταρτου σκέλους του περιστατικού είναι κάθε μία εξαρτημένη από την προηγούμενη της. Τελικά η πιθανότητα P_i ατυχήματος με διαρροή βαγονιού HAZMAT σε ένα τμήμα ℓ της διαδρομής μπορεί τελικά να προσδιοριστεί ως (Verma, 2011):

$$P_{\ell} = P(A_{\ell}) \times P(D' | A_{\ell}) \times P(H | D', A_{\ell}) \times P(R | H, D', A_{\ell}) \quad (1)$$

Όπου:

$P(A_{\ell})$: η πιθανότητα ατυχήματος A της αμαξοστοιχίας στο τμήμα ℓ της γραμμής,

$P(D' | A_{\ell})$: η εξαρτημένη πιθανότητα εκτροχιασμού D, του βαγονιού που βρίσκεται στην i υποδεκάδα του τραίνου εξαιτίας του ατυχήματος A της αμαξοστοιχίας στο τμήμα ℓ της γραμμής,

$P(H | D', A_{\ell})$: η εξαρτημένη πιθανότητα εκτροχιασμού του βαγονιού HAZMAT που βρίσκεται στην i υποδεκάδα του τραίνου εξαιτίας του εκτροχιασμού D λόγω ατυχήματος A της αμαξοστοιχίας στο τμήμα ℓ της γραμμής,

$P(R | H, D', A_{\ell})$: η εξαρτημένη πιθανότητα διαρροής ΕΦ από το εκτροχιασμένο βαγόνι που βρίσκεται στην i υποδεκάδα του τραίνου εξαιτίας του εκτροχιασμού D λόγω ατυχήματος A της αμαξοστοιχίας στο τμήμα ℓ της γραμμής,

Η ανεξάρτητη πιθανότητα $P(A_{\ell})$ καθορίζεται ως ο δείκτης ατυχημάτων του τμήματος ℓ της σιδηροδρομικής γραμμής όπως αυτός προσδιορίζεται από τα ιστορικά δεδομένα προηγούμενων ετών. Όπως είναι αναμενόμενο, οι σιδηροδρομικές και στατιστικές υπηρεσίες δεν διαθέτουν στοιχεία για κάθε τμήμα ℓ της σιδηροδρομικής τροχιάς εξαιτίας της σπανιότητας των ατυχημάτων HAZMAT, αλλά παράγουν συγκεντρωτικά στοιχεία, όπως ο ετήσιος δείκτης ατυχημάτων. Επιπλέον οι (Erkut & Verter, 1998) απέδειξαν ότι εξαιτίας της πολύ μικρής κλίμακας της πιθανότητας ατυχήματος στο οδικό δίκτυο (της τάξης του 10^{-6} ατυχήματα ανά διανυθέντα χιλιόμετρα) το σφάλμα της παραδοχής ενιαίου δείκτη ατυχήματος είναι αμελητέο. Συμπερασματικά, αφενός ελλείπει των λεπτομερειακών δεδομένων δεικτών ατυχημάτων σε κάθε τμήμα σιδηροδρομικής τροχιάς, αφετέρου εξαιτίας της μικρής τάξης των πιθανοτήτων ατυχήματος, οι μελετητές στην πλειοψηφία τους, κάνουν χρήση των συγκεντρωτικών ποσοστών ατυχημάτων όλου του σιδηροδρομικού δικτύου και τελικά:

$P(A_{\ell}) =$ ο δείκτης ατυχημάτων για όλο το σιδηροδρομικό δίκτυο όμοιου τύπου.

Η (Verma, 2011) στη μεθοδολογία εκτίμησης επικινδυνότητας κατά τη σιδηροδρομική μεταφορά ΕΦ που παρουσιάζει, προσδιορίζει το δείκτη ατυχημάτων βάσει των διαθέσιμων δεικτών ατυχημάτων της FRA για πεδίο και για σταθμό μεταφόρτωσης, ανά έτος, για την περίοδο 1995 έως 2008 (**Error! Reference source not found.**)

Πίνακας 4.1: Αριθμός εκτροχιασμών ($\times 10^{-6}$) ανά εκατομμύρια διανυθέντα διεθνή μίλια
(πηγή: table 2 από (Verma, 2011), FRA website)

Ετος	Όλο το δίκτυο	Πεδίο	Σταθμοί μεταφόρτωσης
1995	3,7	1,6	14,2
1996	3,6	1,6	14,2
1997	3,5	1,5	14,4
1998	3,8	1,6	15,6
1999	3,9	1,4	17,5
2000	4,2	1,5	18,5
2001	4,4	1,7	18,9
2002	3,7	1,3	17,4
2003	4,1	1,5	20,4
2004	4,5	1,6	22,8
2005	4,2	1,5	21
2006	3,8	1,4	17,9
2007	3,4	1,3	13,5
2008	3,3	1,2	13,5

Ο μέσος όρος των παραπάνω ποσοστών ατυχημάτων είναι $1,48 \times 10^{-6}$ ατυχήματα/διανυθέν μίλι για το πεδίο (μέσος όρος 2^{ης} στήλης), $17,13 \times 10^{-6}$ ατυχήματα/διανυθέν μίλι εντός των σταθμών μεταφόρτωσης (μέσος όρος 3^{ης} στήλης) και $3,86 \times 10^{-6}$ ατυχήματα/μίλι για όλο το δίκτυο (μέσος όρος 1^{ης} στήλης). Ως μίλι εννοείται το διεθνές ή αλλιώς στατικό μίλι (ίσο με 1609m)

Επιπλέον για τον υπολογισμό των εξαρτημένων πιθανοτήτων εφάρμοσε λογικά διαγράμματα και το θεώρημα Bayes πάνω σε μια βάση δεδομένων που διαμόρφωσε με τη χρήση των διαθέσιμων επίσημων δεδομένων των ατυχημάτων της περιόδου 1995-2009, από την FRA. Συγκεκριμένα αναλύθηκαν 24.664 αναφορές εκτροχιασμού εμπορευματικού τραίνου, συμπεριλαμβανομένων περίπου 16.000 αναφορών στο πεδίο και των υπολοίπων στους σταθμούς μεταφόρτωσης. Στη βάση δεδομένων καταχωρήθηκαν τα στοιχεία κάθε αναφοράς, όπως ο αριθμός των απλών και των HAZMAT βαγονιών, πόσα από κάθε τύπο εκτροχιάστηκαν, το σημείο εκτροχιασμού του τραίνου (Point of Derailment POD) ο αριθμός των βαγονιών HAZMAT που διέρρευσαν. Επίσης κάθε καταγραφή κατηγοριοποιήθηκε σε Κοντό(short S), Μεσαίο(Medium, M) και Μακρύ(long, L) τρένο και στον τύπο δικτύου(δηλαδή αν το ατύχημα συνέβη στο πεδίο ή στο σταθμό μεταφόρτωσης). Τελικά παράχθηκαν τιμές των εξαρτημένων πιθανοτήτων ανάλογα με το μέγεθος του τραίνου και την υποδεκάδα που βρίσκεται το βαγόνι HAZMAT.

Στο σημείο αυτό σημειώνεται ότι η FRA διερευνά και καταγράφει ως σιδηροδρομικά ατυχήματα/συμβάντα τις παρακάτω περιπτώσεις, σύμφωνα με τα γενικά κριτήρια που παρουσιάζει στην ηλεκτρονική της σελίδα (FRA, 2020):

- Οποιαδήποτε σύγκρουση (στο πεδίο ή στην τροχιά σταθμού), εκτροχιασμό ή συμβάντα επιβατικών αμαξοστοιχιών που έχει ως αποτέλεσμα τουλάχιστον ένα θάνατο ή σοβαρό τραυματισμό επιβατών ή μελών πληρώματος.
- Οποιοδήποτε ατύχημα που σχετίζεται με την αμαξοστοιχία το οποίο οδηγεί σε θάνατο εργαζομένου εν ώρα υπηρεσίας, συμπεριλαμβανομένου ενός υπαλλήλου ενός εργολάβου σε σιδηροδρομικό δίκτυο.
- Οποιοδήποτε ατύχημα σε διασταύρωσης οδικού και σιδηροδρομικού άξονα που έχει τουλάχιστον ένα θανατηφόρο.
- Κάθε μη θανατηφόρο ατύχημα που έχει ως αποτέλεσμα τον εκτροχιασμό μιας μηχανής, 15 ή περισσότερα βαγόνια και εκτεταμένες ζημιές σε περιουσιακά στοιχεία.
- Οποιοδήποτε ατύχημα / συμβάν που προκαλεί πυρκαγιά, έκρηξη, εκκένωση ή διαρροή επικίνδυνων φορτίων, ειδικά εάν εκθέτει ή απειλεί πληθυσμό σε αυτούς τους κινδύνους
- Κάθε ατύχημα / συμβάν που αφορά αμαξοστοιχία που μεταφέρει πυρηνικά υλικά.
- Οποιοδήποτε ατύχημα αμαξοστοιχίας που περιλαμβάνει εξοπλισμό διαφυγής ή εξέλασης, με ή χωρίς μηχανές έλξης.
- Κάθε ατύχημα που προκαλείται από βλάβη μιας μηχανής έλξης ή οποιουδήποτε μέρους μιας μηχανής έλξης ή ενός προσώπου που έρχεται σε επαφή με ένα ηλεκτρικά ενεργοποιούμενο τμήμα που έχει ως αποτέλεσμα σοβαρό τραυματισμό ή θάνατο ενός ή περισσότερων προσώπων.
- Ατυχήματα που οφείλονται σε αστοχία σηματοδότησης συμπεριλαμβανομένων των βλαβών και των δυσλειτουργιών που σχετίζονται με το σύστημα PTC
- Κάθε άλλο ατύχημα / συμβάν αμαξοστοιχίας που ενδέχεται να δημιουργήσει σημαντικό δημόσιο συμφέρον.

Παρόλ' αυτά στην παρούσα περίπτωση εκτίμησης πιθανότητας ατυχήματος με εμπλοκή αμαξοστοιχίας που μεταφέρει HAZMAT, οι υπολογισμοί έχουν βασιστεί στα ατυχήματα που οδηγούν σε εκτροχιασμό βαγονιού ανεξαρτήτως της αιτίας που οδήγησε στον εκτροχιασμό.

2. Οι (Iranitalab & A.Khattak, 2019b) θέτοντας ως στόχο την εκτίμηση της πιθανότητας διαρροής του επικίνδυνου φορτίου ενός εκτροχιασμένου βαγονιού, σύγκριναν εναλλακτικές μεθόδους κατηγοριοποίησης όπου η εξαρτημένη

μεταβλητή (response variable) ήταν η διαρροή ή όχι του υλικού και στις ανεξάρτητες επεξηγηματικές μεταβλητές (explanatory variables) περιλαμβάνονταν το συμβάν, τα χαρακτηριστικά της σιδηροτροχιάς, το περιβάλλον και τα χαρακτηριστικά του τραίνου. Οι μέθοδοι κατηγοριοποίησης που συγκρίθηκαν ήταν (a) η (μεικτή) λογιστική παλινδρόμηση, (b) η Random Forests (βασίζεται σε πολλαπλούς αλγορίθμους μάθησης για την επίτευξη καλύτερης προγνωστικής απόδοσης), (c) η Naïve Bayes (βασίζεται στο θεώρημα του Bayes) (d) οι μηχανές φορέα υποστήριξης -Support Vector Machines (e) η παλινδρόμηση Poisson. Τα αποτελέσματα της σύγκρισης των παραπάνω μεθόδων έδειξαν ότι η μέθοδος Random Forests είχε την καλύτερη απόδοση πρόβλεψης για διαφορετικά κριτήρια (μικρότερη Ρίζα Μέσης Τετραγωνικής Απόκλισης-RMSE) και επομένως είναι η προτεινόμενη από τους ερευνητές.

4.1.3 Εκτίμηση και ποσοτικοποίηση επιπτώσεων ατυχήματος

Ως επίπτωση C (consequence) σιδηροδρομικού ατυχήματος HAZMAT, εννοείται το αναπόφευκτο και μη επιθυμητό αποτέλεσμα που θα προκύψει από την εμπλοκή εμπορευματικού τραίνου που μεταφέρει HAZMAT σε ατύχημα και την διαρροή του επικίνδυνου φορτίου. (Erkut & Verter, 1998) (Erkut & V.Verter, 1995b) (Verma, 2011) Η ακριβής εκτίμηση και πρόβλεψη των επιπτώσεων ενός τέτοιου ατυχήματος δεν αποτελεί εύκολη υπόθεση δεδομένου ότι αφενός τα ατυχήματα HAZMAT είναι σπάνια, αφετέρου διότι οι επιδράσεις των επικίνδυνων φορτίων στην ανθρώπινη ζωή αλλά και οι αλληλοεπιδράσεις μεταξύ τους δεν είναι ευρέως γνωστές. Για τους λόγους αυτούς οι περισσότεροι μελετητές υιοθετούν μια συντηρητική προσέγγιση για τον προσδιορισμό των επιπτώσεων, λαμβάνοντας το δυσμενέστερο, πιο επιβλαβές και επιζήμιο σενάριο που είναι ο μέγιστος αριθμός ανθρώπων που Εκτίθενται σε κίνδυνο, στην περίπτωση διαρροής επικίνδυνου φορτίου.

Η (Verma, 2011) προσάρμοσε την μεθοδολογία υπολογισμού του εκτεθειμένου πληθυσμού που είχε ήδη προταθεί από άλλους ερευνητές (Batta & Chiu, 1988) (Revelle, et al., 1991), στην περίπτωση και στα δεδομένα του σιδηροδρομικού ατυχήματος HAZMAT. Η πρόταση της (Verma, 2011) αναφέρει τα παρακάτω:

Η επίπτωση ενός ατυχήματος A εκφράζεται ως ο εκτεθειμένος στον κίνδυνο πληθυσμός. Ο εκτεθειμένος πληθυσμός εξαρτάται από τον όγκο του επικίνδυνου φορτίου που διαρρέει από πολλαπλές πηγές (δεδομένου ότι μεγαλύτερος όγκος διαφεύγοντος φορτίου συνεπάγεται μεγαλύτερη περιοχή επιρροής του

ατυχήματος) και από την πυκνότητα του πληθυσμού εντός της περιοχής επιρροής. Συνοπτικά τα παραπάνω περιγράφονται στις εξισώσεις (2) και (3).

$$C(A_\ell) = PE_\ell = f(V_\ell, p(V_\ell)) \quad (2)$$

όπου $C(A_\ell)$ η επίπτωση του ατυχήματος A , PE_ℓ είναι ο εκτεθειμένος πληθυσμός, V_ℓ είναι ο όγκος του επικίνδυνου φορτίου που διέρρευσε εξαιτίας ατυχήματος A στο σιδηροδρομικό τμήμα ℓ και $p(V_\ell)$ είναι η πυκνότητα του πληθυσμού των κέντρων που Εκτίθενται σε κίνδυνο εξαιτίας της διαρροής της ποσότητας V_ℓ .

Τελικά ο εκτεθειμένος πληθυσμός υπολογίζεται ως ο πληθυσμός που βρίσκεται εντός της περιοχής επιρροής του ατυχήματος κατά μήκος της διαδρομής ℓ , ήτοι $C(A_\ell) = PE_\ell = \text{Area}(X') p(V_\ell)$ (3)

4.1.3.1 Εξακρίβωση της κατηγορίας και του όγκου των επικίνδυνων φορτίων

Σύμφωνα με την (Verma, 2011), σε περίπτωση ατυχήματος, η αλληλεπίδραση των ΕΦ που γειτνιάζουν δεν είναι απολύτως γνωστή, για τον λόγο αυτό κατά τον καθορισμό του συνολικού διαφεύγοντος φορτίου, λαμβάνει το δυσμενέστερο σενάριο, όπου όλο το μεταφερόμενο επικίνδυνο φορτίο διαρρέει, και από τα n βαγόνια HAZMAT. Τελικά ο όγκος διαρροής θα είναι:

$$V_\ell = \sum v_i^n \quad (4)$$

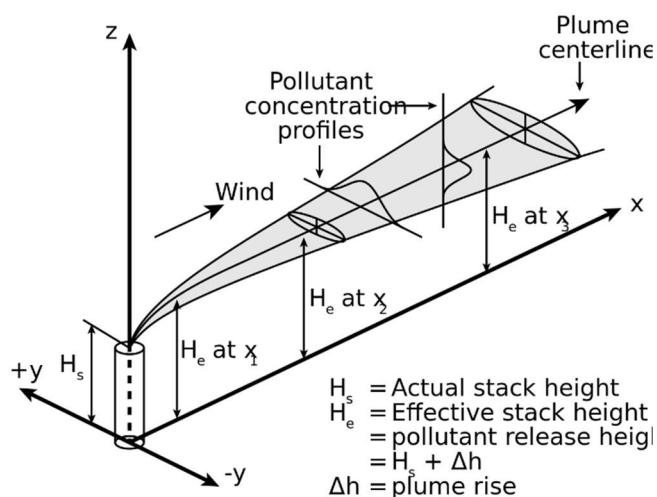
όπου v_i^n είναι η ποσότητα του ΕΦ που διέρρευσε από το βαγόνι n εξαιτίας του ατυχήματος στο ℓ και V_ℓ ο συνολικός όγκος του ΕΦ που διέρρευσε από όλες της πηγές ΕΦ, εξαιτίας του ατυχήματος στο ℓ .

Επιπρόσθετα βασίζεται στην παραδοχή ότι το υλικό που μεταφέρεται έχει την ιδιότητα κατά την διαρροή του να μετατρέπεται σε αερομεταφερόμενα σωματίδια (όπως χλώριο, προπάνιο, αμμωνία) προκαλώντας τοξική μόλυνση στην ζώνη επιρροής. Η παραδοχή αυτή αποτελεί δυσμενέστερο σενάριο ως προς το μέγεθος της ζώνης επιρροής που πρέπει να υπολογιστεί, μιας και τα σωματίδια έχουν την ιδιότητα να ταξιδεύουν μεγάλες αποστάσεις και επομένως να επηρεάζουν ευρύτερες περιοχές.

4.1.3.2 Προσδιορισμός σεναρίου επιπτώσεων ατυχήματος

Η χωρική κατανομή των επιπέδων τοξικής συγκέντρωσης που εκπέμπεται από τη διαρροή τοξικών αερίων, προσομοιώνεται μέσω μοντέλων διασποράς αερίων. Οι (Verma & Verter, 2007) (Verma, 2011) επέλεξαν το μοντέλο Γκαουσσσιανής διασποράς αερίων (Gaussian plume model, GPM), το οποίο υποθέτει ότι η μέγιστη συγκέντρωση μόλυνσης παρατηρείται στα κατάντη σημεία της πηγής με την φορά του ανέμου, ενώ η μόλυνση εξαπλώνεται από τον άξονα προς τα έξω ακολουθώντας μια κανονική κατανομή (βλέπε Εικόνα 4).

Εικόνα 4: Απεικόνιση διασποράς αεροσωματιδίων κατά το μοντέλο Γκαουσσσιανής διασποράς (πηγή: (wikipedia.org, 2020))



Τελικά το επίπεδο συγκέντρωσης ρυπογόνων και τοξικών ουσιών εξαιτίας της διαρροής μίας πηγής επικίνδυνου φορτίου(ενός βαγονιού), δεδομένου ότι η μέγιστη συγκέντρωση παρατηρείται στα κατάντη σημεία με τη φορά του ανέμου, όπου η απόσταση $y=0$, προκύπτει από την συνάρτηση:

$$C(x) = Q / \pi u \sigma_y \sigma_z \quad (5)$$

Όπου $C(x)$ το επίπεδο συγκέντρωσης τοξικότητας (σε ppm) στο κατάντη σημείο x σε σταθερή κατάσταση, Q ο ρυθμός διαρροής των ρύπων (σε mg/sec) u η μέση ταχύτητα ανέμου (σε m/sec) και σ_y, σ_z η μεταβλητή οριζόντιας και κατακόρυφης διασποράς αντίστοιχα, όπου $\sigma_y = ax^b$, $\sigma_z = cx^d$ και x η απόσταση του κατάντη σημείου x από την πηγή. Γίνεται χρήση της παρατήρησης ότι τα κατάντη σημεία της διεύθυνσης του ανέμου λαμβάνουν την μεγαλύτερη συγκέντρωση για κάθε δεδομένη απόσταση. Οι a, b, c, d είναι παράμετροι διασποράς που καθορίζονται από την τάξη ατμοσφαιρικής σταθερότητας (από A έως F) όπως κάθε κατηγορία

προσδιορίζεται από τον συνδυασμό της ηλιακής ακτινοβολίας, συννεφιάς, υγρασίας και της επίδρασης με ταχύτητα ανέμου. Οι (Pasquill & Smith, 1983) και (Arya, 1999) έχουν προσδιορίσει τις τιμές των παραμέτρων a, b, c, d για τις τάξεις A, B, C, D, E, F ατμοσφαιρικής σταθερότητας.

Για τον υπολογισμό της συγκέντρωσης $C(x)$ σε σταθερή κατάσταση το μοντέλο υποθέτει ότι ο ρυθμός διαρροής και οι ατμοσφαιρικές συνθήκες παραμένουν σταθερές κατά τη διάρκεια της εξάπλωσης. Παρότι οι συνθήκες σταθερής κατάστασης είναι σπάνιο να επιτευχθούν, η παραδοχή αυτή είναι συνηθισμένη και εύλογη για την πρώτη ώρα της διαρροής (Verma, 2011)

Στην συνέχεια για τον υπολογισμό της συνολικής συγκέντρωσης ρύπων από πολλαπλές πηγές διαρροής ΕΦ, δηλαδή από όλα τα βαγόνια HAZMAT που διαρρέουν, οι (Verma & Verter, 2007) λαμβάνουν τις υποθέσεις ότι:

- ο η μόλυνση από μια συστοιχία πηγών που βρίσκονται σε τυχαία θέση και με αυθαίρετη δύναμη εκπομπής, μπορεί να μοντελοποιηθεί επικαλύπτοντας τα ίχνη της μόλυνσης από πολλαπλές πηγές διαρροής (Pasquill & Smith, 1983), (Arya, 1999) και έτσι να συγκεντρωθεί το σύνολο της μόλυνσης που προκύπτει, σε κάθε σημείο επιρροής.
- Όλα τα βαγόνια του τραίνου που περιέχουν ΕΦ βρίσκονται συγκεντρωμένα σε ένα τμήμα του τραίνου και ότι όλες οι πηγές διαρροής ΕΦ βρίσκονται στο κέντρο του τμήματος αυτού.

Και η συνολική συγκέντρωση $\hat{C}_n(x)$ στη κατάντη (με τη φορά του ανέμου) απόσταση x , λόγω διαρροής τοξικού αερίου από n διαφορετικά βαγόνια, δίνεται από την προσαρμογή της εξίσωσης (5) για n πηγές(βαγόνια) που διαρρέουν, από τον τύπο:

$$\hat{C}_n(x) = [\sum^n n_i Q_i] / \pi u a c x^b x^d \quad (6)$$

Όπου n_i ο αριθμός των βαγονιών HAZMAT με ρυθμό διαρροής Q_i .

Σχετικά με τα σενάρια επιπτώσεων που προσομοιώνονται, οι (Verma & Verter, 2007) και (Verma, 2011) έκαναν χρήση του λογισμικού **Areal Locations of Hazardous Atmospheres** με ακρωνύμιο ALOHA -έκδοση 2009) το οποίο υπολογίζει με βάση το Γκαουσιανό μοντέλο διασποράς αερίων (Gaussian plume model, GPM).

Συγκεκριμένα επιλύθηκαν μια σειρά σεναρίων διαρροής χλωρίου με διαφορετικές διαμέτρους οπών του βαγονιού. Σημειώνεται ότι κατά την προσομοίωση της διαρροής χλωρίου, το ALOHA θεωρεί ότι το υλικό διαχέεται ως μείγμα αερίου και αεροζόλ, δηλαδή σε δύο φάσεις ροής. Πρόκειται για ένα πυκνό και βαρύτερο από τον αέρα, αέριο του οποίου η εξάπλωση μπορεί να εκτιμηθεί με χρήση του GPM.

Τα αποτελέσματα των προσομοιωμένων σεναρίων παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.2, όπου για διαφορετικό μέγεθος οπής του βαγονιού και διαφορετικό ρυθμό διαρροής δίνεται ο χρόνος για την διαφυγή όλης της επικίνδυνης ύλης και η υπολογιζόμενη από το πρόγραμμα απόσταση της απειλούμενης ζώνης, λαμβάνοντας υπόψη της τα οριακά επίπεδα συγκέντρωσης της τρίτης κατηγορία οξείας έκθεσης σε χλώριο (Acute Exposure Guidelines levels AEGL-3, βλέπε ενότητα 3.4).

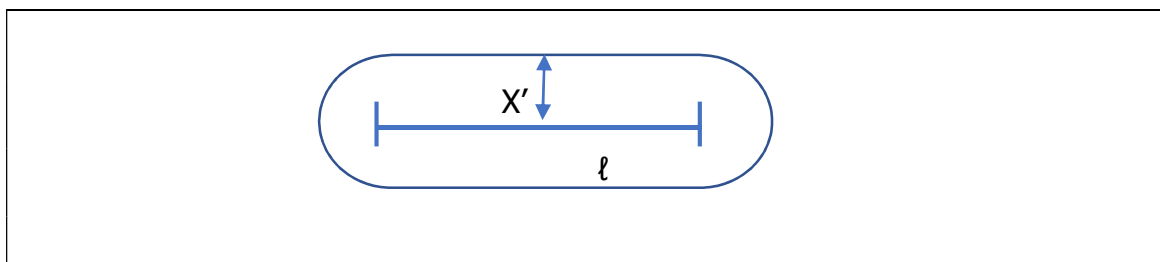
Πίνακας 4.2: Προσομοίωση σεναρίων διαρροής χλωρίου με ALOHA (Πηγή: (Verma, 2011))

Διάμετρος Ρωγμής (in)	Ρυθμός Διαρροής (Kg/min)	Χρόνος αδεάσματος (min)
1	784,71	60
2	3.116,18	28
3	6.985,32	12
4	12.473,79	7
5	19.459,11	5
6	27.850,57	4
7	37.648,17	3
8	48.534,38	2
9	60.781,38	2
10	73.935,56	2
11	81.646,63	1

4.1.3.3 Υπολογισμός ζώνης επιρροής ατυχήματος

Για τον προσδιορισμό του εκτεθειμένου πληθυσμού είναι αναγκαίος ο υπολογισμός της **περιοχής (ή ζώνης) επιρροής** δηλαδή της περιοχής γύρω από το πιθανό σημείο εξέλιξης του ατυχήματος Α η οποία θα επηρεαστεί από τις επιπτώσεις της διαρροής του ΕΦ. Η περιοχή αυτή παρουσιάζεται ως ένα κύκλος με κέντρο το σημείο ατυχήματος και ακτίνα Χ'. Επομένως για το τμήμα διαδρομής ℓ η περιοχή επιρροής θα έχει τη μορφή κυλίνδρου (βλέπε Εικόνα 5) ενώ ο πληθυσμός που κατοικεί στην περιοχή αυτή αποτελεί τον εκτιθέμενο πληθυσμό του ατυχήματος Α.

Εικόνα 5 : Ζώνη επιρροής ατυχήματος κατά μήκος τμήματος ℓ



Στην περίπτωση όπου η ποσότητα του ΕΦ που μπορεί να διαρρεύσει δεν είναι σημαντική (δηλ. ελάχιστη διαρροή) η περιοχή επιρροής υπολογίζεται βάσει της απόστασης εκκένωσης όπως προδιαγράφεται στην Οδηγία Αντιμετώπισης Έκτακτης Ανάγκης της Βόρειας Αμερικής (ERG, 2008)

Παρόλ' αυτά στις υπό περιπτώσεις σιδηροδρομικού ατυχήματος λαμβάνοντας υπόψη το δυσμενέστερο σενάριο, η ζώνη επιρροής υπολογίζεται από τη αναμόρφωση και επίλυση της εξίσωσης (6) ως προς X' , αν $\hat{C}_n(x)$ ισούται με \hat{C} δηλαδή την οριακή επικίνδυνη τιμή συγκέντρωσης τοξικότητας για την ζωή και την υγεία. Στο σημείο αυτό αναφέρουμε ότι η (Verma, 2011) λαμβάνει υπόψη στην επίλυση της περίπτωσης μελέτης που περιλαμβάνει στην πρότασή της το επίπεδο AEGL-3 (βλέπε ενότητα 3.4), σύμφωνα με τις υποδείξεις του Εθνικού Ινστιτούτου Επαγγελματικής Ασφάλειας και Υγείας της Βόρειας Αμερικής (National Institute for Occupational Safety and Health -NIOSH), ως εξής:

$$X' = {}^{b+d}\sqrt{([\sum^n n_i Q_i] / \pi u a c \hat{C})} \quad (7)$$

Η εκτιμώμενη από την (7) απόσταση εκκένωσης X' καθορίζει τα πληθυσμιακά κέντρα που πιθανώς θα εκτεθούν εξαιτίας του σιδηροδρομικού ατυχήματος στο τμήμα ℓ .

Για την περίπτωση της διαρροής χλωρίου στο επίπεδο AEGL-3, η απειλούμενη περιοχή για την ζωή και ασφάλεια ενός ατόμου που βρίσκεται εντός της, αντιστοιχεί σε έκθεση σε ποσότητα 20ppm για 60 λεπτά.

Το λογισμικό ALOHA που προσομοιάζει το σενάριο ατυχήματος, υπολογίζει το μήκος X' της περιοχής επίδρασης (threat zone). Στη συνέχεια υπολογίζεται η περιοχή επιρροής κατά μήκος της διαδρομής, ενώ ο εκτεθειμένος πληθυσμός υπολογίζεται μέσω ArcView GIS.

4.1.4 Εκτίμηση επικινδυνότητας μέσω υπολογισμού της αναμενόμενης επίπτωσης ατυχήματος.

Σύμφωνα με την (Verma, 2011), (Saccomanno, et al., 1990) η επικινδυνότητα ενός ατυχήματος A κατά την μεταφορά ΕΦ στο σιδηροδρομικό τμήμα ℓ υπολογίζεται ως :

Risk = πιθανότητα ατυχήματος HAZMAT και διαρροή ΕΦ \times Επίπτωση του ατυχήματος

ή Risk = $P(A_\ell) \times P(D^i|A_\ell) \times P(H|D^i, A_\ell) \times P(R|H, D^i, A_\ell) \times C(A_\ell)$

και τελικά η επικινδυνότητα σε όρους κοινωνικής διακινδύνευσης ισούται :

Risk = $P(A_\ell) \times P(D^i|A_\ell) \times P(H|D^i, A_\ell) \times P(R|H, D^i, A_\ell) \times PE_\ell$ (8)

Όπως οι παράμετροι $P(A_\ell)$, $P(D^i|A_\ell)$, $P(H|D^i, A_\ell)$, $P(R|H, D^i, A_\ell)$, PE_ℓ έχουν ήδη περιγραφεί και υπολογιστεί στις ενότητες 4.1.1 έως 4.1.3.

4.2 Μεθοδολογίες διαχείρισης επικινδυνότητας (Risk Management)

Σε ότι αφορά στη σιδηροδρομική μεταφορά επικίνδυνων φορτίων, έναν ευρύ τομέα της πρόσφατης έρευνας γύρω από την εκτιμώμενη επικινδυνότητα του μεταφορικού έργου, αποτελούν οι προτάσεις που μελετούν τη διαχείριση του κινδύνου πιθανού σιδηροδρομικού ατυχήματος και μεθόδους μείωσης της επικινδυνότητας.

Σύμφωνα με το διεθνές πρότυπο ISO 31000, ως *διαχείριση κινδύνου* νοείται η «*διαδικασία που περιλαμβάνει αναλυτικές και διαχειριστικές δραστηριότητες που εστιάζουν στον εντοπισμό και την ανταπόκριση στις εγγενείς αβεβαιότητες που προκύπτουν κατά τη διαχείριση μιας πολύπλοκης οργάνωσης και των περιουσιακών της στοιχείων*».

Στο πλαίσιο της σιδηροδρομικής μεταφοράς επικίνδυνων φορτίων ως διαχείριση κινδύνου εννοούνται οι ενέργειες και οι τεχνικές που στοχεύουν στην μείωση της επικινδυνότητας. Αναλυτικότερα στον τομέα αυτό περιλαμβάνονται :

- (i) οι τεχνικές βελτίωσης ασφάλειας σιδηροδρομικής επιδομής
- (ii) αναβάθμιση βαγονιών μεταφοράς HAZMAT,

- (iii) σύνθεση τραίνου (δηλαδή η βέλτιστη τοποθέτηση των βαγονιών HAZMAT)
- (iv) τεχνικές σχεδιασμού και δρομολόγησης μεταφοράς των ΕΦ(planning and routing).

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται μελέτες διαχείρισης κινδύνου που προσφάτως έχουν προταθεί από ερευνητές και έχουν δημοσιοποιηθεί στη διεθνή βιβλιογραφία με βάση την κατηγοριοποίηση που παραπάνω αναφέρθηκε. Σημειώνεται ότι η πλειοψηφία των ερευνητών εστιάζουν στο σχεδιασμό της μεταφοράς (κατηγορία iv) δηλαδή την εύρεση της βέλτιστης διαδρομής από σκοπιάς ασφάλειας και κόστους . Αξίζει να σημειωθεί ότι στην περίπτωση της χρήσης του σιδηροδρομικού δικτύου υφίσταται η δυσκολία εξεύρεσης οικονομικά αποδεκτής εναλλακτικής διαδρομής, δεδομένου ότι στις περισσότερες περιπτώσεις το σιδηροδρομικό δίκτυο δεν είναι τόσο πυκνό ώστε να διαθέτει εναλλακτικές διαδρομές μεταξύ ενός ζεύγους εκκίνησης-προορισμού.

4.2.1. Μείωση επικινδυνότητας μέσω βελτίωσης ασφάλειας σιδηροδρομικής επιδομής

Η μείωση της επικινδυνότητας κατά την μεταφορά ΕΦ μέσω του σιδηροδρομικού δικτύου σχετίζεται σε μεγάλο ποσοστό με την ποιότητα της επιδομής. Διερευνώντας τη βάση δεδομένων της FRA για την περίοδο 2000-2014, προέκυψε ότι το 24% των εκτροχιασμών οφείλονται στην αστοχία της επιδομής, ποσοστό μεγαλύτερο από κάθε άλλο παράγοντα. (Liu, 2017). Ιδιαίτερα οι αστοχίες των διασταυρώσεων της σιδηροτροχιάς οφειλόμενες στη κόπωση του μετάλλου αποτελούν την πιο συνηθισμένη περίπτωση ατυχήματος και εκτροχιασμού τραίνων. (Liu, et al., 2014) Κατά αντιστοιχία το κόστος επισκευής σιδηροτροχιάς και τροχαίου υλικού εξαιτίας των ατυχημάτων λόγω αστοχίας επιδομής για το έτος 2016 στις ΗΠΑ, έφτασε τα 22 εκατομ. δολάρια (Liu, 2017).

Στις πιο πρόσφατες έρευνες, ο (Liu, 2017) μελετά την σχέση μεταξύ της συχνότητας επιθεωρήσεων ελαττωμάτων σιδηροτροχιάς με χρήση υπερήχου και της επικινδυνότητας σιδηροδρομικής μεταφοράς ΕΦ. Συγκεκριμένα αναπτύσσει ένα μοντέλο βελτιστοποίησης κατά Pareto προκειμένου να καθοριστεί η βέλτιστη συχνότητα επιθεωρήσεων των διαφορετικών τμημάτων του σιδηροδρομικού δικτύου ανάλογα με το επίπεδο επικινδυνότητάς τους. Η πρόταση αυτή βασίζεται στην δυνατότητα επιθεώρησης κάθε τμήματος γραμμής με διαφορετική συχνότητα ανάλογη με την επικινδυνότητα του, δηλ. τα τμήματα της γραμμής που έχουν μεγαλύτερη επικινδυνότητα από ατύχημα HAZMAT να λαμβάνουν συχνότερη επιθεώρηση σε βάρος των τμημάτων των γραμμών μικρότερου

κινδύνου. Το μοντέλο αυτό (α) αξιολογεί την παραγόμενη επικινδυνότητα κατά τη μεταφορά HAZMAT κάθε τμήματος γραμμής εξαιτίας ατυχήματος από αστοχία επιδομής του τμήματος αυτού (b) παράγει μια αξιολόγηση προτεραιοτήτων κατά την επιθεώρηση ελαττωμάτων σιδηροτροχιάς βασιζόμενη στην επικινδυνότητα κάθε τμήματος.

Σημειώνεται ότι για την εκτίμηση της επικινδυνότητας περιλαμβάνει την εξής μεθοδολογία: Ως μέγεθος μέτρησης Επικινδυνότητας R , λαμβάνεται η αναμενόμενη κοινωνική διακινδύνευση ήτοι $R = P \times C$ (ή αλλιώς το παραδοσιακό ρίσκο) όπου P είναι η πιθανότητα ατυχήματος διαρροής ΕΦ λόγω αστοχίας σιδηροτροχιάς και C η επίπτωση του ατυχήματος σε όρους εκτεθειμένου πληθυσμού. Η ζητούμενη πιθανότητα P υπολογίζεται ως συνάρτηση του ετήσιου αριθμού αστοχιών σιδηροτροχιάς ανά μίλι (και κατά επέκταση της ηλικίας και των χαρακτηριστικών της σιδηροδρομικής επιδομής, του κινούμενου μεικτού φορτίου και της ετήσιας συχνότητας επιθεωρήσεων ελαττωμάτων σιδηροτροχιάς) του σημείου εκτροχιασμού του τραίνου (δηλαδή τη θέση του βαγονιού που πρώτο εκτροχιάζεται κατά μήκος του τραίνου), του αριθμού των εκτροχιασμένων βαγονιών ανά ατύχημα (και κατά επέκταση της ταχύτητας του τραίνου, του συνολικού αριθμού βαγονιών του τραίνου και του σημείου εκτροχιασμού) και της εξαρτημένης πιθανότητας διαρροής ΕΦ από το εκτροχιασμένο βαγόνι (για δεδομένο σχεδιασμό και ταχύτητα βαγονιού όπως οι τιμές δημοσιεύονται ανά περιόδους από τον Οργανισμό Σιδηροδρόμου Αμερικής και τον Φορέα Σιδηροδρομικού Ανεφοδιασμού –Association of American Railway -AAR & Railway Supply Institute-RSI). Ως επίπτωση C υπολογίζεται ο εκτεθειμένος σε κίνδυνο πληθυσμός ίσος με το γινόμενο της μέσης πυκνότητας πληθυσμού εντός της περιοχής επιρροής ατυχήματος και της έκτασης της περιοχής επιρροής. Ως περιοχή επιρροής υπολογίζεται η περικλειόμενη εντός κύκλου ακτίνας 0,5μιλίου και κέντρο το σημείο ατυχήματος, όπως υποδεικνύεται στον Αμερικανικό Οδηγό Άμεσης Δράσης (US DOT American Response Guidebook) ως ζώνη εκκένωσης στην περίπτωση φωτιάς από διαρροή εύφλεκτου επικίνδυνου υλικού.

Τελικά, θέτοντας μέγιστο όριο επιθεωρημένων μιλίων, υπολογίζεται η βέλτιστη συχνότητα επιθεωρήσεων ανά τμήμα γραμμής έτσι ώστε να ελαχιστοποιείται η συνολική επικινδυνότητα διαδρομής. Για διαφορετικά μέγιστα όρια επιθεωρημένων μιλίων οι παραγόμενες βέλτιστες λύσεις κατασκευάζουν ένα σύνολο λύσεων κατά κριτήριο Παρέτο (Pareto frontier). Το παραγόμενο pareto frontier αντιπροσωπεύει το βέλτιστο προγραμματισμό επιθεωρήσεων ελαττωμάτων της επιδομής δεδομένης της μέγιστης απόστασης σε μίλια προς επιθεώρηση.

4.2.2. Μείωση επικινδυνότητας μέσω βέλτιστης σύνθεσης της αμαξοστοιχίας

Η θέση όπου τοποθετούνται τα βαγόνια HAZMAT στη σύνθεση του τραίνου επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό την πιθανότητα διαρροής τους όπως αποδεικνύεται από μια πληθώρα μελετών και στατιστικών αναλύσεων ιστορικών δεδομένων και τούτο διότι κατά μήκος του τραίνου κάποιες θέσεις έχουν μεγαλύτερη πιθανότητα εκτροχιασμού σε σχέση με άλλες. Δεδομένου ότι οι μελέτες αυτές δεν αποτελούν μεθοδολογίες εκτίμησης επικινδυνότητας αλλά στατιστικές αναλύσεις δεν ενσωματώνονται αναλυτικά, παρά ενδεικτικά αναφέρονται μερικές όπως: οι (Bagheri, et al., 2011), (Bagheri, et al., 2012), (Bagueri, et al., 2014) υποστηρίζουν ότι η αλλαγή θέσης του βαγονιού/ιων HAZMAT αποτελεί ουσιαστική στρατηγική μείωσης επικινδυνότητας, ενώ οι (J.Cheng, et al., 2017), (Thompson, et al., 1992), (Verma, 2011) παρουσιάζουν στρατηγικές τοποθέτησης των HAZMAT βαγονιών κατά μήκος της αμαξοστοιχίας ώστε να μειωθεί η πιθανότητα εκτροχιασμού τους.

4.2.3. Μείωση επικινδυνότητας μέσω σχεδιασμού και δρομολόγησης του σιδηροδρομικού συστήματος μεταφοράς Ε.Φ

Οι περισσότεροι ερευνητές τα τελευταία χρόνια επικεντρώνονται στην ανάπτυξη μοντέλων που αξιολογούν τις πιθανές σιδηροδρομικές διαδρομές μεταφοράς επικίνδυνων φορτίων θέτοντας ως ζητούμενο την ελαχιστοποίηση της κοινωνικής διακινδύνευσης σε συνδυασμό με τη διατήρηση σχετικά χαμηλού κόστους μεταφοράς, το οποίο επιτυγχάνεται με την έγκαιρη παράδοση των φορτίων, αλλά και της δίκαιης κατανομής της επικινδυνότητας. Επικεντρώνοντας στις νεότερες μελέτες παρουσιάζονται οι παρακάτω προτάσεις:

1. Οι (Fang, et al., 2017) εστιάζουν στη δρομολόγηση και τον χρονοπρογραμματισμό σιδηροδρομικών αποστολών ΕΦ υπό την ύπαρξη προθεσμιών παράδοσης με στόχο την ίση κατανομή της επικινδυνότητας. Συγκεκριμένα εξετάζεται το πρόβλημα της ελαχιστοποίησης του σταθμισμένου αθροίσματος της νωρίτερης και αργοπορημένης παράδοσης (earliness and tardiness) κάθε αποστολής και του κόστους αναμονής του φορτίου στους σταθμούς μεταφόρτωσης, θέτοντας όριο μέγιστου επιτρεπτού κινδύνου σε κάθε σιδηροδρομικό τμήμα που χρησιμοποιείται, Αναλυτικότερα:

– Έστω ότι το διαθέσιμο σιδηροδρομικό δίκτυο L , C αποτελείται από το σύνολο των τμημάτων κίνησης l , όπου $L = \sum l$ και των σταθμών μεταφόρτωσης c , όπου $C = \sum c$, με τη χρήση του οποίου δικτύου πρέπει να παραδοθούν το σύνολο

Μ των m αποστολών ΕΦ, $M = \sum m$. Όταν το φορτίο μεταφέρεται νωρίτερα από τον καθορισμένο χρόνο προκύπτει κόστος –ρήτρα θ , ενώ όταν μεταφέρεται αργοπορημένα προκύπτει κόστος –ρήτρα ψ . Επίσης όταν το ΕΦ παραμένει αδρανές στους σταθμούς μεταφόρτωσης προκύπτει κόστος –ρήτρα η .

– Σε κάθε τμήμα ℓ εφαρμόζεται μέγιστο όριο Επικινδυνότητας R_{\max} για τα τραίνα HAZMAT που κινούνται σε αυτό. Με αυτό τον τρόπο επιτυγχάνεται η ίση κατανομή επικινδυνότητας σε όλες τις διαδρομές ℓ . Για κάθε εμπορευματικό τραίνο που κινείται με ταχύτητα s την τυχαία στιγμή t , ο κίνδυνος R που μπορεί να προκληθεί κατά την κίνηση του στο τμήμα ℓ , πρέπει να ισχύει : $R(\ell, s, t) \leq R_{\max}$. Η συσχέτιση της επικινδυνότητας με την ταχύτητα του τραίνου βασίζεται σε στατιστική ανάλυση πραγματικών δεδομένων ατυχημάτων εκτροχιασμού όπου προέκυψε ότι η μεγαλύτερη ταχύτητα αυξάνει τον αριθμό των εκτροχιασμένων βαγονιών (βλέπε 4.1.1). Επιπλέον γίνεται η παραδοχή ότι η επικινδυνότητα στους σταθμούς μεταφόρτωσης είναι αμελητέα, αφού η ταχύτητα των τραίνων είναι αμελητέα.

– Για την εκτίμηση της Επικινδυνότητας ακολουθείται η πρόταση της (Verma, 2011) όπως έχει αναλυτικά παρουσιαστεί στην ενότητα 4.1, με την διαφορά ότι η εξαρτημένη πιθανότητα εκτροχιασμού του βαγονιού i $P(D^i|A_i)$ υπολογίζεται με στατιστική ανάλυση της βάσης δεδομένων προκειμένου να προκύψει η συσχέτιση με την ταχύτητα τραίνου και η έκφραση της μέσω γραμμικής συνάρτησης.

– Η ζήτηση φορτίων για μεταφορά, είναι υποθετική και παράγεται τυχαία (τυχαία δεδομένα όγκων μεταφοράς ΕΦ)

– Η επίλυση του προβλήματος της σιδηροδρομικής μεταφοράς ΕΦ εντός προθεσμιών επιτυγχάνοντας ίση κατανομή της επικινδυνότητας στο σύνολο του διαθέσιμου δικτύου συνοψίζεται στην εξίσωση ελαχιστοποίησης του συνολικού κόστους ήτοι:

$$\begin{aligned} & \text{Min } \sum \eta + \min \sum (\theta + \psi) && \text{(RTHD problem)} \\ & \text{Min (holding cost) + min (earliness + tardiness cost)} \end{aligned}$$

Θέτοντας περιορισμούς κινδύνου $R(\ell, s, t) \leq R_{\max}'$, μέγιστης ταχύτητας τραίνου s_{ℓ} , και λοιπούς απαραίτητους περιορισμούς για την ταυτόχρονη κίνηση των τραίνων στο ίδιο τμήμα ℓ , τους χρόνους ταξιδιού έναρξης και λήξης κλπ.

– Τελικά η επίλυση του προβλήματος RTHD ακολουθεί τα εξής βήματα:
(i) την επίλυση δύο ακέραιων προγραμμάτων με τη χρήση μηχανής επίλυσης προβλημάτων βελτιστοποίησης για τον υπολογισμό των ορίων λ^- , λ^+ και μ όπου λ , το πλάνο δρομολόγησης για την μεταφορά της m χωρίς ύπαρξη χρόνου αδράνειας στους σταθμούς, και μ το αντίστοιχο πλάνο παραγόμενο από το λ με την ύπαρξη χρόνου αδράνειας στους σταθμούς.

(ii) την επίλυση δύο αλγορίθμων από τους οποίους προκύπτει το βέλτιστο πλάνο δρομολόγησης για κάθε επιμέρους ζήτηση m και το αντίστοιχο κόστος $Cost(m)$.
(iii) την επίλυση ενός ευρετικού αλγόριθμου για την εύρεση εφικτής λύσης του προβλήματος RTHD για το σύνολο των m , διατηρώντας την μέγιστη επιτρεπτή επικινδυνότητα σε κάθε τμήμα ℓ και προσθέτοντας όπου είναι απαραίτητο χρόνο αδράνειας σε σταθμούς μεταφόρτωσης για κάποια φορτία m με στόχο την μικρότερη αύξηση του κόστους. Ευρετικός αλγόριθμος δίνει και το τελικό αποτέλεσμα κόστους $Cost(Time\text{-}and\text{-}Service\text{-}Leg\text{-}Based)$

2. Ιδιαίτερη περίπτωση εφαρμογής περιορισμών ως μέσω διαχείρισης κινδύνου αποτελεί η περίπτωση των Κάτω Χωρών οι οποίες από το 2015 εφαρμόζουν κρατικό θεσμικό πλαίσιο για την μεταφορά των ΕΦ εντός της επικράτειας της, το καλούμενο ως Πλαίσιο Δράσης Βασικού Δικτύου (Basic Network Act) με στόχο την αύξηση της ασφάλειας μέσω του καθορισμού ανώτατων ορίων επικινδυνότητας κατά μήκος των οδικών, σιδηροδρομικών και θαλάσσιων διαδρομών μεταφοράς ΕΦ, καθώς και των δυνατοτήτων χωρικής ανάπτυξης των γειτνιαζουσών περιοχών των διαδρομών αυτών. Το Πλαίσιο αυτό προωθεί την επίτευξη ισορροπίας μεταξύ τριών ενδιαφερόντων της Ασφάλειας, της Μεταφοράς και της Χωρικής Ανάπτυξης, μέσω της ενεργοποίησης των φορέων του τομέα των μεταφορών και των αρμόδιων χωρικής ανάπτυξης πόλεων και της ανάθεσης ενεργειών, ο καθένας στο μερίδιο ευθύνης που του αναλογεί, κάτω από τους κανόνες και τα όρια ασφάλειας που το κράτος νομοθετεί και καθορίζει (π.χ. όρια επικινδυνότητας).

Το Πλαίσιο Δράσης υιοθετεί τον όρο “Εξωτερική Ασφάλεια” προκειμένου να δηλώσει ότι η επικινδυνότητα κατά τη μεταφορά ΕΦ εμπλέκει πολίτες που κατοικούν στις γειτονικές περιοχές και δεν σχετίζονται ή εργάζονται με τις «επικίνδυνες» αυτές δραστηριότητες. Επιπλέον υιοθετούνται οι έννοιες του ατομικού κινδύνου (Individual risk) και του Ομαδικού Κινδύνου (group risk) ως θεσπισμένα πρότυπα μέτρησης επικινδυνότητας.

Ως *Ατομικός Κίνδυνος IR* νοείται η ετήσια πιθανότητα ότι ένα υποθετικό άτομο σε ένα συγκεκριμένο μέρος θα αποβιώσει από ατύχημα προερχόμενο από την σιδηροδρομική μεταφορά ΕΦ. Ο υπολογισμός του IR είναι ανεξάρτητος από τη φυσική παρουσία ατόμων στην περιοχή ενδιαφέροντος αλλά εξαρτάται αποκλειστικά από την σιδηροδρομική υποδομή και τον τύπο και την ποσότητα ΕΦ που μεταφέρεται στην υποδομή αυτή. Η ύπαρξη ή όχι χωρικής ανάπτυξης στις γειτονικές περιοχές δεν επηρεάζουν το υπολογιζόμενο IR. Ειδικά για ευπαθείς εγκαταστάσεις (κατοικίες, σχολεία, νοσοκομεία) εφαρμόζονται θεσπισμένα πρότυπα ατομικού κινδύνου IR. Τα πρότυπα αυτά υποδηλώνουν ότι ένα μη

προστατευμένο άτομο που κατοικεί κοντά σε σιδηροδρομική γραμμή για ένα ολόκληρο έτος δεν θα υποφέρει κίνδυνο θανάτου παραπάνω από 10^{-6} δηλαδή μια φορά ανά ένα εκατομμύριο χρόνια, καθώς και κανένα ευπαθές κτίριο δεν θα κτιστεί εντός του 10^{-6} περιγράμματος. Το περίγραμμα αυτό κατά μήκος του δικτύου οριοθετεί την περιοχή εντός της οποίας η επικινδυνότητα θανάσιμου ατυχήματος ισούται με το πρότυπο IR.

Ως *Ομαδικός Κίνδυνος GR* νοείται η αθροιστική ετήσια πιθανότητα ότι τουλάχιστον 10, 100 ή 1000 άτομα αποβιώνουν την ώρα που βρίσκονται στην επηρεαζόμενη περιοχή εξαιτίας ατυχήματος κατά την μεταφορά ΕΦ. Επομένως το GR επηρεάζεται από τον αριθμό ατόμων που βρίσκονται στην περιοχή επίδρασης του ατυχήματος. Η σχέση αυτή απεικονίζεται σε λογαριθμική κλίμακα μέσω της καμπύλης fN, όπου το f αντιστοιχεί στην συχνότητα ενός ατυχήματος και το N στον αριθμό ατόμων που αναμένεται να αποβιώσουν εξαιτίας του ατυχήματος. Το GR δεν είναι μια περιοριστική τιμή αντιθέτως αποτελεί μια ενδεικτική τιμή από την οποία μπορεί να αποκλίνει. Το GR μπορεί να εκφράζεται και σε όρους περιγράμματος προκειμένου να είναι πιο κατανοητή η αλληλεπίδραση των δύο μέτρων IR και GR. Λόγου χάρη, ένα σχολείο που φοιτούν 1000 μαθητές, βρίσκεται πάνω στο περίγραμμα του $IR = 10^{-7}$, επομένως σε ζώνη όπου το όριο $IR = 10^{-6}$ δεν υπερβαίνεται. Όταν το σχολείο είναι πλήρως ανοικτό (24/7/365 το χρόνο) το ομαδικό ρίσκο, δηλαδή η πιθανότητα ότι οι 1000 μαθητές θα υποστούν θανάσιμο ατύχημα είναι μία κάθε ένα εκατομμύριο χρόνια.

Ως *Ανώτατο όριο Κινδύνου* νοείται η μέγιστη επικινδυνότητα που οι γειτνιάζουσες περιοχές μπορούν να υποστούν εξαιτίας ατυχήματος κατά τη μεταφορά επικίνδυνου φορτίου. Στο Πλαίσιο Δράσης Βασικού Δικτύου τα ανώτατα όρια επικινδυνότητας εκφράζονται ως περιγράμματα (contours) ατομικού κινδύνου $IR 10^{-6}$, 10^{-7} , 10^{-8} και δίδονται σε απόσταση (σε μέτρα) από τον κεντρικό άξονα της αμαξοστοιχίας. Αυτά τα περιγράμματα επίσης οριοθετούν και την περιοχή προς χωρική ανάπτυξη κατά μήκος της σιδηροδρομικής γραμμής. Σύμφωνα με το Πλαίσιο οι πραγματικές μεταφορές ΕΦ καταγράφονται και επανυπολογίζεται το IR με τα πραγματικά δεδομένα μεταφορών. Αν το επανυπολογιζόμενο IR υπερβαίνει τα οριακά θεσπισμένα περιγράμματα IR συνεπάγεται ότι το ανώτατο όριο επικινδυνότητας έχει υπερβεί, εκτός από την περίπτωση που δεν υπάρχουν ευπαθή αντικείμενα στο περίγραμμα IR^{-6} , οπότε το νόμιμο IR πρότυπο ακόμα δεν έχει υπερβεί.

Επιπλέον των οριακών τιμών $IR 10^{-6}$, 10^{-7} , 10^{-8} (σε κάθε τμήμα σιδηροδρομικής γραμμής) που εμπεριέχονται στο Πλαίσιο Δράσης σε μορφή πίνακα, περιλαμβάνονται και πίνακες που αντιστοιχίζουν τις ανώτατες οριακές τιμές IR (σε

κάθε τμήμα γραμμής) με την επιτρεπτή ετήσια ποσότητα μεταφερόμενων επικίνδυνων φορτίων (σε αριθμό βαγονιών) ανά κλάση ΕΦ(π.χ σε ένα σιδηροδρομικό τμήμα Α, τα όρια 10^{-6} , 10^{-7} , 10^{-8} αντιστοιχούν σε αποστάσεις 0, 0 και 15 μέτρα από τον άξονα τραίνου και σε 10 βαγόνια κατηγορίας Α επικίνδυνων υλικών (εύφλεκτων αερίων) και 400 βαγονιών κατηγορίας C3 (εύφλεκτων υγρών) ή σε οποιονδήποτε άλλο συνδυασμό βαγονιών άλλων κατηγοριών αρκεί να μην υπερβαίνουν τα όρια IR). Θέτοντας τα ανώτατα όρια ανά τμήμα σιδηροδρομική γραμμή, το Πλαίσιο Δράσης επιτυγχάνει να καθοδηγεί τους φορείς μεταφοράς ΕΦ στην χρήση κατά κύριο λόγο των σιδηροδρομικών τμημάτων που είναι αμιγώς εμπορευματικής χρήσης όπου οι οριακές τιμές των IR αντιστοιχούν σε μεγαλύτερες επιτρεπόμενες ποσότητες ΕΦ. (Vlies, et al., 2018)

3. Οι (Jabbarzadeh, et al., 2019), προτείνουν μια μέθοδο βελτιστοποίησης που προσδιορίζει τις εναλλακτικές διαδρομές μεταφοράς ΕΦ έτσι ώστε να επέρχεται η επιθυμητή ισορροπία(trade-off) μεταξύ της ζητούμενης συνολικής επικινδυνότητας της διαδρομής και του συνολικού κόστους κάτω από την ύπαρξη τυχαίων διαταραχών των δρομολογίων. Η μελέτη αυτή επικεντρώνεται στην *διαχείριση σοβαρών συμβάντων* (disruptions) που διαταράσσουν την προγραμματισμένη ροή των δρομολογίων μεταφοράς ΕΦ μετατρέποντας τα τμήματα της γραμμής (service legs) που συνέβησαν τα συμβάντα σε ανενεργά. Σημειώνεται ότι η μελέτη αυτή δεν περιλαμβάνει τα μικρά συμβάντα τα οποία δεν απαιτούν επαναπρογραμματισμό των δρομολογίων σύμφωνα με τον διαχωρισμό που παρουσιάζουν οι (Nielsen, et al., 2012) για την περίπτωση του σιδηροδρόμου.

- Για την παραγωγή τυχαίων συμβάντων υιοθετείται η προσέγγιση σεναρίων η οποία ενσωματώνει τον ευέλικτο σχεδιασμό των περιστατικών δηλαδή την τμηματική ή ολική διαταραχή του δρομολογίου, τις ανάλογες ή διακριτές πιθανότητες συμβάντος και την στατιστική ανεξαρτησία ή όχι των συμβάντων μεταξύ τους.

- Στην παρούσα μεθοδολογία διαχείρισης συμβάντων οι ερευνητές αναπτύσσουν και χρησιμοποιούν ένα βελτιωμένο μέγεθος μέτρησης Επικινδυνότητας HAZMAT που συνδυάζει την *αναμενόμενη επικινδυνότητα* κατά τη HAZMAT μεταφορά και την *μεταβλητότητα της επικινδυνότητας* εξαιτίας της αλλαγής πορείας, λόγω του συμβάντος. Στόχος της χρήσης του βελτιωμένου μεγέθους, κατά τους ερευνητές, είναι να «*διαβεβαιωθεί ότι οι μετρήσεις της επικινδυνότητας παραμένουν εντός ανεκτών ορίων όταν ένα συμβάν προκληθεί*». Το σκέλος της αναμενόμενης επικινδυνότητας (expected risk) προσδιορίζεται ως οι αναμενόμενες επιπτώσεις εξαιτίας μεταφοράς ενός αριθμού φορτίων με επικίνδυνες ουσίες (HAZMAT containers) σε διαφορετικά τμήματα του

σιδηροδρομικού δικτύου αθροισμένες για κάθε σενάριο συμβάντων, ενώ η μεταβλητότητα του κινδύνου (variability in risk) εκφράζει πως η επικινδυνότητα μεταβάλλεται σε κάθε σενάριο συμβάντων έναντι της αναμενόμενης επικινδυνότητας.

$$\text{Total Risk} = \text{Expected Risk}(\mu) + \text{Variability in Risk}(\sigma) \Rightarrow$$

$$\text{Total Risk} = \sum p^s \sum \sum \sum Y_a q_a X^s + \sum p^s | \sum \sum \sum Y_a q_a X^s - \mu |$$

όπου p^s η πιθανότητα του σεναρίου s , Y_a η πιθανότητα εκτροχιασμού και διαρροής ενός επικίνδυνου φορτίου στο τμήμα a , q_a η επίπτωση του εκτροχιασμού και διαρροής του ενός φορτίου και X^s η ποσότητα φορτίων στο σενάριο s . Στόχος του μοντέλου είναι η ελαχιστοποίηση της συνολικής επικινδυνότητας αλλά και η αποφυγή λύσεων με μικρή αναμενόμενη επικινδυνότητα και μεγάλη μεταβλητότητα κινδύνου εξαιτίας συμβάντος.

– Επίσης στόχος του μοντέλου είναι η ελαχιστοποίηση του συνολικού αναμενόμενου κόστους το οποίο αποτελείται από το κόστος μεταφοράς των φορτίων (επικίνδυνων και μη) και το κόστος που προκύπτει από το συμβάν και την αλλαγή του δρομολογίου προκειμένου το φορτίο να φτάσει στον επιθυμητό προορισμό εντός του χρόνου παράδοσης.

– Τελικά για την επίλυση του δι-παραγοντικού στοχαστικού προγράμματος βελτιστοποίησης (P) το οποίο εκφράζεται ως:

Πρώτο αντικείμενο: HAZMAT Risk

Δεύτερο αντικείμενο : Expected Cost

Υπό τους περιορισμούς επικινδυνότητας και κόστους

επιλέγεται η ενισχυμένη προσέγγιση έψιλον περιορισμών (augmented ϵ -constraint approach) η οποία όχι μόνο προλαμβάνει την παραγωγή αδύναμων λύσεων κατά Pareto, όπως πετυχαίνει η καθιερωμένη τεχνική έψιλον περιορισμών (ϵ -constraint), αλλά επιπλέον επιταχύνει τη διαδικασία επίλυσης αποφεύγοντας τις περιττές επιλύσεις (Mavrotas & Florios, 2013). Κατά την επίλυση του διπαραγοντικού μοντέλου η ενισχυμένη προσέγγιση έψιλον περιορισμών μεταβάλλει την αξία του συντελεστή ϵ δίνοντας διαφορετικά ζεύγη αποτελεσμάτων για ρίσκο και κόστος (trade-off) καθώς και τις λύσεις του ελάχιστου κόστους και της ελάχιστης επικινδυνότητας.

– Για τον υπολογισμό των αναμενόμενων επιπτώσεων, σε όρους εκτεθειμένου πληθυσμού, καθώς και της πιθανότητας εκτροχιασμού και της εξαρτημένης πιθανότητας διαρροής του φορτίου εφαρμόζεται η πρόταση της (Verma, 2011), όπως περιγράφονται αναλυτικά στην ενότητα 4.1

– Η πιθανότητα να συμβεί κάθε σενάριο σε ένα σύνολο τμημάτων της γραμμής μπορεί να εκτιμηθεί από το κλάσμα του χρόνου που κάθε τμήμα γραμμής έχει διαταραχθεί με βάση τα ιστορικά ετήσια δεδομένα.

Τελικά η προτεινόμενη μεθοδολογία δίνοντας ζεύγη τιμών επικινδυνότητας και κόστους τα οποία αντιστοιχούν σε διαφορετικές διαδρομές ή διαφορετικούς τρόπους μεταφοράς του επιθυμητού φορτίου εξαιτίας συμβάντος (λ.χ. προσθέτοντας επιπλέον μεταφορική ικανότητα σε ασφαλέστερα σιδηροδρομικά τμήματα ή με την επανα-δρομολόγηση και τη χρήση logistics τρίτων μερών) αφενός επιτρέπει την περαιτέρω ανάλυση κόστους- κινδύνου, αφετέρου μπορεί να αποτελέσει ένα αξιόλογο εργαλείο τόσο στα χέρια των Αρχών όσο και στους φορείς διαχείρισης του σιδηροδρομικού δικτύου και τις εταιρείες μεταφορών επικίνδυνων φορτίων.

4. Μία ενδιαφέρουσα διάσταση της αύξησης της ασφάλειας κατά τη σιδηροδρομική μεταφορά επικίνδυνων φορτίων μέσω της επιλογής βέλτιστης διαδρομής, δίνουν οι (Khanmohamedi, et al., 2018) οι οποίοι προτείνουν ένα μοντέλο προσδιορισμού της τρωτότητας κάθε δυνατής σιδηροδρομικής διαδρομής σε πιθανή τρομοκρατική επίθεση συνοδευόμενο από ένα δι- παραγοντικό μοντέλο βασιζόμενο στην θεωρία των παιγνίων η επίλυση του οποίου προσδιορίζει τις πιθανότητες κάθε διαδρομή να αποτελέσει στόχο τρομοκρατικής επίθεσης. Αναλυτικότερα, για κάθε δυνατή διαδρομή μεταξύ ζευγών εκκίνησης και προορισμού του σιδηροδρομικού δικτύου η πρόταση περιλαμβάνει τα εξής βήματα:

– Σε πρώτο βήμα υπολογίζεται η τρωτότητα ως προς την ασφάλεια κάθε διαδρομής. Ένα σύστημα ανάλυσης της τρωτότητας μπορεί να οδηγήσει στην μετρίαση των απειλών καθώς και στη μείωση των συνεπειών των επιθέσεων και μπορεί να αποτελέσει τον κατάλληλο τρόπο ελάφρυνσης του κινδύνου ασφάλειας (safety risk) σύμφωνα με την αρχική εξίσωση:

$Risk = Threat \times Vulnerability \times Consequences$ (Moore, et al., 2007).

Στην παρούσα πρόταση η τρωτότητα υπολογίζεται βασιζόμενη στις πιθανότητες και στις επιπτώσεις ενός συμβάντος τρομοκρατικής επίθεσης. Ως επιπτώσεις εννοούνται ο προσδιορισμός του εκτεθειμένου στον κίνδυνο πληθυσμού καθώς και της εκτιθέμενης στον κίνδυνο υποδομής (δηλ. αθλητικά, εκπαιδευτικά, εμπορικά και νοσοκομειακά κέντρα καθώς θρησκευτικούς χώρους, κυβερνητικά κτίρια, αεροδρόμια πάρκα μουσεία). Για τον προσδιορισμό των επιπτώσεων αρχικά προσδιορίζονται οι περιοχές επίδρασης (σε επίπεδο AEGL-3) του συμβάντος με την χρήση του λογισμικού ALOHA για την περίπτωση επίθεσης σε φορτίο χλωρίου (τοξική εισπνεόμενη ουσία –Toxic Inhalation Hazard material ή TIH material, η οποία αποτελεί ευρέως διαδεδομένο μεταφερόμενο φορτίο μέσω σιδ. Δικτύου στις ΗΠΑ), δεδομένου του όγκου μεταφοράς και των χαρακτηριστικών του φορτίου, των καιρικών, δομικών και περιβαλλοντικών συνθηκών.

– Στη συνέχεια με την χρήση του λογισμικού ArcGIS υπολογίζεται η κατά μήκος της κάθε διαδρομής ζώνη επίδρασης (buffer zones) και με την χρήση των διαθέσιμων δημογραφικών και δομικών στοιχείων (πυκνότητα πληθυσμού και κτιρίων) καθορίζεται ο συνολικός πληθυσμός και κτιριακή υποδομή που Εκτίθεται στην περίπτωση τρομοκρατικού συμβάντος ανά διαδρομή.

– Στο τρίτο βήμα προτείνεται ένα δι-παραγοντικό μοντέλο βασιζόμενο στην θεωρία παιγνίων προκειμένου να μοντελοποιηθούν και να παραχθούν οι βέλτιστες στρατηγικές επιλογής διαδρομής τόσο για τον χρήστη του σιδηροδρομικού δικτύου –μεταφορέα των επικίνδυνων υλικών όσο και τον τρομοκράτη. Όπως οι παρόντες ερευνητές αναφέρουν, *η θεωρία παιγνίων είναι ένα σύνολο αναλυτικών εργαλείων που αναλύει την αλληλεπίδραση μεταξύ υπευθύνων λήψης αποφάσεων (decision makers). Η θεωρία των Παιγνίων βασίζεται σε δύο υποθέσεις σχετικά με τους αρμόδιους λήψης αποφάσεων, τον ορθολογισμό και την στρατηγική φύση των αποφάσεων των παικτών καθώς και στην υπόθεση ότι κάθε παίκτης απαιτεί την υψηλότερη δυνατή διεκδίκηση & εξαργύρωση της απόφασής του (payoff) για τον εαυτό του.* Στην περίπτωση μελέτης συστήματος μεταφοράς ως στόχο τρομοκρατικής επίθεσης, όπου ένας έξυπνος τρομοκράτης επιλέγει στόχους με βάση τις αμυντικές ικανότητες του αμυνόμενου, η ιχνηλάτιση της επιθετικής στρατηγικής τρομοκρατών επιτυγχάνεται αποτελεσματικότερα με τη χρήση της θεωρίας παιγνίων (Bier et al, 2009) και για το λόγο αυτό έχει υιοθετηθεί από πληθώρα ερευνών μεταφορικών συστημάτων. Στην παρούσα έρευνα χρησιμοποιείται το ανταγωνιστικό παίγνιο μηδενικού αθροίσματος (non cooperative zero-sum game) όπου οι δύο παίκτες, μεταφορέας και τρομοκράτης, έχουν αντίθετα συμφέροντα και το κέρδος ή οι απώλειες του ενός παίκτη ισορροπούν με τις απώλειες ή κέρδος του άλλου παίκτη (ισορροπία Nash) ενώ η αξία των συνολικών κερδών και απωλειών του παιγνίου είναι μηδενική. Συγκεκριμένα το πλήθος των ανθρώπων και της υποδομής που Εκτίθενται στην τρομοκρατική επίθεση αποτελεί το κέρδος του τρομοκράτη ο οποίος στοχεύει στη μεγιστοποίηση του (μεγιστοποίηση επιπτώσεων συμβάντος) και την απώλεια του μεταφορέα ο οποίος στοχεύει στην ελαχιστοποίηση του (ελαχιστοποίηση των επιπτώσεων συμβάντος). Το δι-παραγοντικό μοντέλο που προτείνεται εκφράζεται από τις εξισώσεις:

$$F_1: \min_p (\max_q (\sum p_i C_{ij} q_j))$$

$$F_2: \min_p (\max_q (\sum p_i V_{ij} q_j))$$

$$\text{Με περιορισμούς } \sum p_i = 1, \sum q_j = 1$$

Όπου p η πιθανότητα επιλογής κάθε διαδρομής από τον μεταφορέα, q η πιθανότητα επιλογής κάθε διαδρομής από τον τρομοκράτη, C ο πίνακας επιπτώσεων στον εκτιθέμενο πληθυσμό που ο μεταφορέας θα υποφέρει από τη στρατηγική του η οποία καθορίζεται από την επιλογή της γραμμής i του πίνακα

και ο τρομοκράτης θα επιβάλει επιλέγοντας τη στήλη j του πίνακα. Ομοίως V ο αντίστοιχος πίνακας επιπτώσεων στην εκτιθέμενη υποδομή.

– Στο επόμενο τέταρτο βήμα για την επίλυση του διπαραγοντικού μοντέλου, σκοπός είναι η εξεύρεση μιας σειράς σχετικά βέλτιστων λύσεων κατά Παρέτο (Pareto frontier) η οποία επιτυγχάνεται με την χρήση της τεχνικής των έψιλον περιορισμών, όπου τα σημεία του Pareto frontier είναι τα σημεία που έχουν την ίδια προτεραιότητα να επιλεχθούν ως διαδρομή. Αφού προκύψει το σύνολο των βέλτιστων λύσεων, ο αρμόδιος λήψης αποφάσεων μπορεί να επιλέξει την επιθυμητή ανάλογα με το επίπεδο επιθυμίας κάθε στόχου.

– Τελικά από την επίλυση του μοντέλου προκύπτει η κατανομή πιθανοτήτων επιλογής διαδρομής για τον μεταφορέα και υπολογίζεται η κατανομή πιθανοτήτων επιλογής σιδηροδρομικών τμημάτων για τον τρομοκράτη. Με αυτόν τον τρόπο καθορίζονται τα κρίσιμα σιδηροδρομικά τμήματα για την εκδήλωση τρομοκρατικού συμβάντος και για διαφορετικά επιθυμητά αποτελέσματα του τρομοκράτη, σύμφωνα με την κατανομή πιθανοτήτων επιλογής διαδρομής ανάλογα των επιθυμητών αποτελεσμάτων ασφάλειας του μεταφορέα.

4.3. Μεθοδολογίες εκτίμησης επικινδυνότητας με στόχο την ίση και δίκαιη κατανομή κινδύνου κατά την μεταφορά επικίνδυνων φορτίων (Equity Risk)

Στην ενότητα αυτή εξετάζεται μια διαφορετική διάσταση της επικινδυνότητας των μεταφορικών δικτύων εξαιτίας των επικίνδυνων φορτίων. Η διάσταση αυτή δεν αφορά στην μεμονωμένη εκτιμώμενη επικινδυνότητα μιας διαδρομής μεταξύ ενός σημείου εκκίνησης και προορισμού, αλλά εξετάζει τη συνολικά παραγόμενη επικινδυνότητα στο συνολικό δίκτυο της ευρύτερης περιοχής (π.χ. μιας περιφέρειας ή μιας χώρας).

Αναλυτικότερα, μεταξύ των εμπλεκόμενων ομάδων σε ένα μεταφορικό σύστημα μεταφοράς ΕΦ είναι οι ομάδες των αποστολέων και παραληπτών των επικίνδυνων φορτίων οι οποίοι είναι αυτοί που αποφασίζουν για την επιλογή του σημείου εκκίνησης, της διαδρομής από την οποία θα μεταφερθεί το φορτίο και του τελικού προορισμού. Όπως είναι αναμενόμενο, τα κριτήρια των ενδιαφερόμενων ομάδων αποστολέων και παραληπτών είναι κοινά και αφορούν στο κόστος, στην ταχύτητα παράδοσης και στην ασφάλεια της διαδρομής που επιλέγουν. Εξαιτίας των κοινών αυτών κριτηρίων αναμένεται ότι οι ομάδες αυτές θα επιλέγουν πάντα τη διαδρομή που είναι οικονομικότερη, γρηγορότερη και ασφαλέστερη (δηλαδή παρουσιάζει

την μικρότερη επικινδυνότητα). Με αυτόν τον τρόπο αυξάνεται η ζήτηση της διαδρομής αυτής και άρα η χρήση της, γεγονός που μπορεί τελικά να οδηγήσει στην αύξηση της επικινδυνότητας της αφού τελικά έχει αυξηθεί η πιθανότητα ατυχήματος στη διαδρομή αυτή. Αποτέλεσμα αυτού είναι να εκτίθεται στον κίνδυνο συχνότερα ο ίδιος πληθυσμός. Αντιθέτως άλλες διαδρομές (μεταξύ των ίδιων σημείων εκκίνησης και προορισμού) οι οποίες αρχικά είχαν εκτιμηθεί ως πιο επικίνδυνες, καταλήγουν ως ασφαλέστερες αφού η χρήση τους για μεταφορά ΕΦ είναι πια περιορισμένη. Αντίστοιχα ο πληθυσμός που γειτνιάζει στις διαδρομές αυτές δεν εκτίθεται τελικά στον κίνδυνο με την ίδια συχνότητα.

Η επίλυση του προβλήματος αυτού περιγράφεται ως δίκαιη και ίση χωρική κατανομή του κινδύνου στο σύνολο του πληθυσμού της περιοχής. Αρμόδια ομάδα -μεταξύ των εμπλεκόμενων στο μεταφορικό σύστημα- είναι συνήθως οι κρατικές αρχές και λοιπές αρχές δημόσιας διοίκησης και μεταφοράς. Η ομάδα αυτή οφείλει να εξετάζει τη συνολικά παραγόμενη επικινδυνότητα στο σύνολο του μεταφορικού δικτύου, δηλαδή όλες τις διαδρομές μεταξύ πολλαπλών σημείων εκκίνησης και προορισμού προσπαθώντας να ρυθμίσει την προκύπτουσα επικινδυνότητα εξαιτίας της μεταφοράς ΕΦ στο σύνολο του δικτύου.

Για την επίτευξη της ίσης και δίκαιης κατανομής επικινδυνότητας έχουν προταθεί μια πληθώρα εναλλακτικών λύσεων και μεθόδων οι οποίες μπορούν να κατηγοριοποιηθούν ως εξής:

- Μέθοδοι που εισάγουν εναλλακτικά μεγέθη εκτίμησης επικινδυνότητας, τα οποία εκφράζουν την «αποστροφή σε κίνδυνο» όταν μια διαδρομή είναι ήδη «επιφορτισμένη» με επικινδυνότητα και επιλέγουν εναλλακτικές διαδρομές (βλέπε στη συνέχεια 4.3.1, 4.3.2)
- Μέθοδοι που στοχεύουν στην αποσυμφόρηση των πολύ διαδεδομένων διαδρομών προκειμένου να υιοθετηθούν από τις αρμόδιες αρχές. Μερικές μέθοδοι αφορούν στον περιορισμό χρήσης συγκεκριμένων οδικών τμημάτων (Bianco, et al., 2009) (Dadkar, et al., 2010), (Erkut & Gzara, 2008), (B.Y.Kara & Verter, 2004), ή/και προωθώντας τους μεταφορείς στη χρήση περιοχών με λιγότερη συνολική επικινδυνότητα, μέσω της εφαρμογής διοδίων σε οδικά τμήματα (Bianco, et al., 2016), (Esfandeh, et al., 2016), (Marcotte, et al., 2009), (Wang, et al., 2012). Επίσης οι (Kang, et al., 2014b) ανέπτυξαν ένα μοντέλο δρομολόγησης και σχεδιασμού HAZMAT μεταφορών με στόχο την ίση κατανομή επικινδυνότητας υπό τη δομή του μεγέθους Αξία-Σε –Κίνδυνο.

Στην ενότητα αυτή επιλέγεται να παρουσιαστούν αναλυτικότερα οι προτάσεις της πρώτης κατηγορίας μιας και αφορούν κατεξοχήν μεθόδους εκτίμησης επικινδυνότητας.

4.3.1. Εκτίμηση επικινδυνότητας μεταφοράς HAZMAT μέσω του υπολογισμού της Αξίας-Σε- Κίνδυνο (Value –at-risk)

Την τελευταία τριετία αντικείμενο των ερευνητών αποτελεί η υιοθέτηση του μεγέθους Αξία- σε- Κίνδυνο (Value –at-risk) και σε συντομία VaR ως μέτρο εκτίμησης επικινδυνότητας κατά την μεταφορά ΕΦ. Το μέγεθος αυτό που κυρίως χρησιμοποιείται στην οικονομική επιστήμη και ιδιαίτερα στον τομέα διαχείρισης χαρτοφυλακίων, έχει πλέον βρει εφαρμογή και σε εναλλακτικούς τομείς όπως ο αγροτικός τομέας. (Kang, et al., 2014b). Σημειώνεται ότι στον τομέα των μεταφορών ΕΦ κατά την εφαρμογή του μοντέλου VaR, ως εισαγόμενη αξία ή επένδυση (input ή investment) θεωρείται η διαδρομή (route) και σαν απώλεια(loss) λαμβάνεται η επίπτωση δηλαδή ο εκτεθειμένος πληθυσμός, σε αντίθεση με την εφαρμογή του στον οικονομικό τομέα όπου και η εισαγόμενη αξία και η απώλεια μετρούνται με το ίδιο μέγεθος π.χ. χρήματα. Μια επιπλέον διαφορά είναι ότι στην περίπτωση εφαρμογής VaR στον οικονομικό τομέα, οι απώλειες είναι προσθετικές ενώ στην περίπτωση των μεταφορών ΕΦ η επικινδυνότητα κάθε οδικού τμήματος κάθε διαδρομής είναι ανεξάρτητη, μη-προσθετική (Toumazis, et al., 2013)

Σύμφωνα με τους ερευνητές (Kang, et al., 2014a), (Kang, et al., 2014b) (Hosseini & Verma, 2017) τα τρία μεγέθη επικινδυνότητας που ήδη αναφέρθηκαν IP, PE, TR(ή SR) διαθέτουν ουδέτερη φύση ως προς τον προσδιορισμό της επικινδυνότητας διότι αντιμετωπίζουν το πιθανό ατύχημα κατά τη μεταφορά ΕΦ ως γεγονός με μικρή πιθανότητα –μεγάλη επίπτωση . Με αυτό τον τρόπο τα μεγέθη αυτά δεν μπορούν να δώσουν αποτελέσματα που να οδηγήσουν στην πρόληψη ατυχημάτων με πολύ μεγάλες επιπτώσεις κατά τη μεταφορά ΕΦ. Επιπλέον οι μέθοδοι εκτίμησης επικινδυνότητας που βασίζονται στον προσδιορισμό των παραπάνω τριών μεγεθών IP, PE, TR(ή SR) κατά τη σιδηροδρομική μεταφορά ΕΦ, παράγουν αποτέλεσμα για μία μόνο διαδρομή μεταξύ δεδομένης εκκίνησης και προορισμού, της εξεταζόμενης διαδρομής, μη επιτυγχάνοντας την ίση και δίκαιη κατανομή επικινδυνότητας. Για τους παραπάνω λόγους οι ερευνητές αναζητούν ένα εναλλακτικό μέγεθος εκτίμησης της επικινδυνότητας που να διευκολύνει την επιλογή εναλλακτικής διαδρομής μεταφοράς ΕΦ με στόχο την **αποστροφή της επικινδυνότητας** (risk –averse routing).

Προς αυτή την τάση, οι (Kang, et al., 2014a) (Kang, et al., 2014b) πρότειναν ένα μοντέλο εκτίμησης της Αξίας-σε Κίνδυνο (VaR) κατά την οδική μεταφορά ΕΦ, ενώ οι (Hosseini & Verma, 2017) πρότειναν ένα αντίστοιχο μοντέλο εκτίμησης VaR κατά τη σιδηροδρομική μεταφορά ΕΦ. Και στις δύο περιπτώσεις ως Αξία –σε-Κίνδυνο νοείται ο αριθμός των ανθρώπων που Εκτίθενται σε κίνδυνο από την μεταφορά ΕΦ, δεδομένου συγκεκριμένου διαστήματος εμπιστοσύνης. Συγκεκριμένα, για καθορισμένο διάστημα εμπιστοσύνης α (0,1) η Αξία-σε Κίνδυνο VaR για τυχαία Επικινδυνότητα R μιας διαδρομής ℓ δίνεται από την εξίσωση:

$$VaR_{\alpha}^{\ell} = \min \{ \beta \mid F_{R,\ell}(\beta) \geq \alpha \}$$

Όπου:

- β είναι το όριο επικινδυνότητας (threshold) το οποίο εξ' ορισμού δεν μπορεί να ξεπεραστεί
- $F_{R,\ell}(\beta)$ είναι η Αθροιστική Συνάρτηση Κατανομής (ΑΣΚ) της επικινδυνότητας R κατά μήκος του τμήματος διαδρομής ℓ . Η Συνάρτηση αυτή εξ' ορισμού καθορίζει τη συμπεριφορά της επικινδυνότητας R , και είναι θεμελιώδης στον ορισμό της VaR. Για την ΑΣΚ ισχύει ότι $F_{R,\ell}(\beta) = \Pr(R \leq \beta)$, όπου $\Pr(R \leq \beta)$ είναι η πιθανότητα της Επικινδυνότητας R να μην ξεπεράσει το όριο β .

Επομένως η Αξία-σε –Κίνδυνο VaR_{α}^{ℓ} είναι το ελάχιστο όριο β έτσι ώστε η επικινδυνότητα R^{ℓ} της μεταφοράς ΕΦ δεν θα φτάσει την τιμή β με την μικρότερη πιθανότητα α .

Σημειώνεται ότι το threshold β κάθε διαδρομής απεικονίζει μαθηματικά την αναφερόμενη αποστροφή σε κίνδυνο, αφού ερμηνεύεται ως το όριο της συνολικής επικινδυνότητας μιας διαδρομής το οποίο δεν μπορεί να ξεπεραστεί και άρα θα πρέπει να επιλεγθεί άλλη διαδρομή για την μεταφορά του ΕΦ.

Από την γραφική απεικόνιση της ΑΣΚ αποδεικνύεται ότι για κάθε επίπεδο εμπιστοσύνης α η Αξία-σε –Κίνδυνο VaR_{α}^{ℓ} είναι ίση με $C_{(t)}^{\ell}$ δηλαδή την t -ιοστή μικρότερη επίπτωση ατυχήματος ενός βαγονιού (ή οχήματος) ΕΦ. Επομένως το πρόβλημα του υπολογισμού της Αξία-σε –Κίνδυνο VaR_{α}^{ℓ} ισούται με την επίλυση του παρακάτω προβλήματος:

$$\text{Min } C_{(t)}^{\ell}$$

Υπό την συνθήκη:

$$P_{(t)}^{\ell} \leq 1-\alpha < P_{(t)}^{\ell} + P_{(t)}^{\ell}, \text{ όταν το } t \in \{0,1,2,3...\text{ni}\}$$

Όπου $P_{(t)}^{\ell}$ το άθροισμα των επιμέρους πιθανοτήτων ατυχήματος στα τμήματα διαδρομής και στους σταθμούς μεταφόρτωσης.

- Δεδομένο ότι το ζητούμενο είναι η εύρεση της διαδρομής με την ελάχιστη Αξία-σε –Κίνδυνο VaR^l_a μεταξύ εναλλακτικών διαδρομών, κάθε μία από τις οποίες αποτελείται από ένα σύνολο σιδηροδρομικών τμημάτων και των ενδιάμεσων σταθμών μεταφόρτωσης, τελικά το πρόβλημα αντιμετωπίζεται ως δι-επιπεδιακό πρόβλημα ελαχιστοποίησης, όπου το μοντέλο ελαχιστοποίησης πρέπει να παράξει την ελάχιστη VaR^l_a όπου $l \in L$, μεταξύ ενός δεδομένου ζεύγους σταθμών εκκίνησης και προορισμού και όλων των δυνατών διαδρομών μεταφοράς του ΕΦ, L .
- Για την επίλυση του προβλήματος ελαχιστοποίησης γίνεται χρήση του αλγορίθμου εύρεσης συντομότερης διαδρομής του Dijkstra (Ντάικστρα) και καθορίζονται οι δύο δυαδικές μεταβλητές απόφασης καθώς και οι απαραίτητοι περιορισμοί ροής. Συγκεκριμένα ο αλγόριθμος Ντάικστρα επιλύει την εξίσωση $f^r = \min_{P(r)} X$ για κάθε διαδρομή r έως ότου ικανοποιηθεί η συνθήκη $f^r \leq 1-\alpha < f^r + P(r)$, όπου τότε η $VaR_a = C(r)$. Ο αλγόριθμος κωδικοποιείται σε Matlab R 2015b, επιλύεται σε GAMS 24.1.3 με χρήση Cplex12.5.1.0.
- Για τον υπολογισμό των επιμέρους και των συνολικών πιθανοτήτων ατυχήματος με διαρροή ΕΦ $P^l(t)$, $P^l(t)$ ακολουθείται ο τρόπος επίλυσης που περιγράφεται στην (Verma, 2011) και έχει περιγραφεί στην ενότητα 4.1 του παρόντος όπου οι πιθανότητες ατυχήματος υπολογίζονται για κάθε υπο-δεκάδα του τραίνου μιας και αυτές εξαρτώνται από τον αριθμό των βαγονιών με ΕΦ και την συνολική διαμόρφωση του τραίνου. Σημειώνεται ότι διαφορετική διαμόρφωση τραίνου έχει ως αποτέλεσμα διαφορετικές τιμές επικινδυνότητες και άρα Αξίες-σε –Κίνδυνο.
- Για τον προσδιορισμό των επιπτώσεων ατυχήματος $C^l(t)$ υπολογίζεται ο εκτεθειμένος πληθυσμός σε κίνδυνο κατά τη μεταφορά ΕΦ, ο οποίος εξαρτάται από την πυκνότητα πληθυσμού και τον όγκο του ΕΦ που έχει διαρρεύσει σύμφωνα με την μέθοδο που παρουσιάζεται στην (Verma & Verter, 2007) και (Verma, 2011). Για λόγους εξασφάλισης του δυσμενέστερου σεναρίου πρέπει να υποθεθεί ότι το σύνολο του ΕΦ που το τραίνο μεταφέρει θα διαρρεύσει.
- Τελικά μέσω του αλγορίθμου Ντάικστρα προκύπτει η διαδρομή με την μικρότερη Αξία-σε Κίνδυνο VaR^l_a για συγκεκριμένη σύνθεση τραίνου και επίπεδο εμπιστοσύνης. Η επίλυση του προβλήματος επαναλαμβάνεται για τέσσερα επίπεδα εμπιστοσύνης ($\alpha_1=0,9$ $\alpha_2=0,99999$, $\alpha_3 =0,999997$, $\alpha_4=0,999999$) καθώς και για επτά διαφορετικούς όγκους μεταφερόμενων ΕΦ.(Αριθμός βαγονιών με ΕΦ: 5, 20,40,60,80,100,120). Οι επιλύσεις έδειξαν ότι (i) για τα α_1 και α_2 επίπεδα εμπιστοσύνης προτείνεται η ίδια διαδρομή και για τους επτά διαφορετικούς όγκους ΕΦ, ενώ η Αξία-σε –Κίνδυνο είναι ίση με μηδέν. Η μηδενική VaR συμβαίνει όταν $0 < \alpha \leq P^l(0)$ δηλαδή όταν το επίπεδο εμπιστοσύνης είναι μικρότερο ή ίσο από την πιθανότητα ατυχήματος $P^l(0)$ που αντιστοιχεί στην μηδενική επίπτωση ατυχήματος $C^l(0)$, διότι το επίπεδο εμπιστοσύνης δεν είναι αρκετά μεγάλο σε σχέση με την συνολική πιθανότητα ατυχήματος της διαδρομής

- (ii) η Αξία-σε –Κίνδυνο μεγαλώνει όσο μεγαλώνει το επίπεδο εμπιστοσύνη και όσο αυξάνεται ο αριθμός των βαγονιών HAZMAT. (iii) Για σταθερή σύνθεση τραίνου, η μεγαλύτερη Αξία-σε –Κίνδυνο καταγράφεται στο υψηλότερο επίπεδο εμπιστοσύνης (iv) Για σταθερό επίπεδο εμπιστοσύνης, η μεγαλύτερη Αξία-σε –Κίνδυνο καταγράφεται για τον μεγαλύτερο μεταφερόμενο όγκο ΕΦ, όπου το μοντέλο αναζητά να βρει μεγαλύτερη αλλά ασφαλέστερη διαδρομή, επιλέγοντας περιφερειακά τμήματα κίνησης και περιφερειακούς σταθμούς μεταφόρτωσης (με μικρότερη πυκνότητα πληθυσμού).(v) η επίλυση του ίδιου προβλήματος με την χρήση TR, IP, PE μεγεθών επικινδυνότητας και η σύγκριση των αποτελεσμάτων έδειξε ότι: (a) για a_1 , και a_2 και για $N=5$ έως 120 η διαδρομή με την βέλτιστη VaR η οποία προκύπτει μηδενική, είναι ίδια με την διαδρομή με μικρότερη IP. Ομοίως και για a_3 και $N=5, 20, 40, 60$ και a_4 $N=5, 20$. (b) για a_3 και για $N=100, 120$ η διαδρομή με την βέλτιστη VaR είναι ίδια με την διαδρομή με μικρότερο TR (c) η επίλυση με το μέγεθος PE δίνει πάντα την ίδια διαδρομή ανεξαρτήτως πιθανότητας ατυχήματος ή σύνθεσης τραίνου η οποία δεν συμπίπτει με καμία διαδρομή με βέλτιστη VaR.
- Σύμφωνα με τους ερευνητές που εισήγαν την παρούσα μεθοδολογία εκτίμησης επικινδυνότητας με την χρήση του μεγέθους Αξία –σε –Κίνδυνο VaR, η μεθοδολογία αυτή ενσωματώνει τη δυνατότητα παραγωγής πολλαπλών διαδρομών μεταφοράς ΕΦ μεταξύ συγκεκριμένου ζεύγους εκκίνησης και προορισμού ανάλογα με την προτίμησή της τιμή επικινδυνότητας. Συγκεκριμένα καθώς το επίπεδο εμπιστοσύνης κινείται από τη θεωρητική μηδενική του τιμή στην θεωρητική μέγιστη τιμή της μονάδας, η προτεινόμενη λύση εγκαταλείπει τον ουδέτερο χαρακτήρα της υπολογιζόμενης επικινδυνότητας (risk –neutral) και ακολουθεί το μοντέλο επιλογής βέλτιστης διαδρομής με κριτήριο την αποστροφή του κινδύνου (risk –averse), όπου ασφαλέστερες αλλά μεγαλύτερες διαδρομές επιλέγονται, χρησιμοποιώντας το περιφερειακό σιδηροδρομικό δίκτυο και σταθμούς. Παρόλ’ αυτά η χρήση του μεγέθους VaR , σύμφωνα με τους μελετητές παρουσιάζει τις εξής αδυναμίες(i) στις περιπτώσεις μηδενικής VaR, ουσιαστικά δεν είναι δυνατός ο υπολογισμός της συνολικής επικινδυνότητας της διαδρομής (ii) σε ορισμένες περιπτώσεις το μοντέλο δεν κατάφερνε να απεικονίσει την πληροφορία του πρόσθετου εκτεθειμένου πληθυσμού εξαιτίας ατυχήματος, (iii) η προτεινόμενη προσέγγιση υπολογισμού της Αξίας–σε –Κίνδυνο VaR διαθέτει στατικότητα, ενώ στην πραγματικότητα οι πιθανότητες ατυχήματος και οι επιπτώσεις ατυχήματος στα σιδηροδρομικά τμήματα και στους σταθμούς μεταφόρτωσης μπορεί να ποικίλουν με τον χρόνο (ανά ημέρα, εβδομάδα , μήνα) ή να διαθέτουν εγγενείς ανακρίβειες που απαιτούν τεχνικές εύρωστης βελτιστοποίησης με πιο δυναμική ή στοχαστική μορφή. (Hosseini & Verma, 2017)

4.3.2. Εκτίμηση Επικινδυνότητας με τη χρήση του μεγέθους Δεσμευμένη Αξία –σε- Κίνδυνο (Conditional Value at Risk σε συντομία CVaR)

Όπως μόλις αναφέρθηκε, η χρήση του μεγέθους Αξία-σε Κίνδυνο VaR παρότι ενσωματώνει την αποστροφή σε κίνδυνο κατά την επιλογή βέλτιστης διαδρομής μεταφοράς ΕΦ, παρουσιάζει αδυναμίες που μπορεί να οδηγήσουν στην ανακριβή εκτίμηση της επικινδυνότητας. Οι (Artzner, et al., 1999) έχουν υποστηρίξει ότι τα μέτρα κινδύνου, όπως είναι η Αξία-σε Κίνδυνο VaR, θα πρέπει να είναι συνεκτικά δηλαδή να πληρούν τις προϋποθέσεις της υπο-προσθετικότητας, της θετικής ομοιογένειας, της μονοτονικότητας, και τη μεταφορά σταθερότητας. Κατά τους Artzner et al, η Αξία-σε Κίνδυνο VaR δεν ικανοποιεί την προϋπόθεση της υπο-προσθετικότητας και δεν λαμβάνει υπόψη την ουρά της κατανομής (tail of distribution).

Οι αδυναμίες του μεγέθους αυτού, οδήγησαν στην ανάπτυξη ενός πιο αναβαθμισμένου μεγέθους μέτρησης επικινδυνότητας, την Δεσμευμένη Αξία -σε- Κίνδυνο ή αλλιώς Αξία -σε - Κίνδυνο υπό συνθήκη (Conditional Value at Risk). Αναλυτικότερα η Δεσμευμένη Αξία –σε- Κίνδυνο CVaR ορίζεται ως εξής:

Για μια τυχαία μεταβλητή X που εκφράζει απώλεια(ή ζημία) και έχει αθροιστική συνάρτηση συνεχούς κατανομής $F_X(x)$, η CVaR για ένα δεδομένο επίπεδο εμπιστοσύνης α καθορίζεται ως η αναμενόμενη απώλεια όταν η απώλεια είναι μεγαλύτερη ή ίση με την VaR, δηλαδή:

$$CVaR = E [X | X \geq VaR_\alpha(X)]$$

Για κατανομές με πιθανές ασυνέχειες, η Δεσμευμένη Αξία –σε- Κίνδυνο CVaR αντικαθίσταται από τους όρους $CVaR^+$ και σε $CVaR^-$. Η αξία $CVaR^+$ στη βιβλιογραφία είναι γνωστή ως η αναμενόμενη ζημία υπό τον όρο ότι η ζημία είναι μεγαλύτερη ή ίση από ένα συγκεκριμένο επίπεδο αποκοπής (cutlevel) που συνήθως είναι η VaR. Σύμφωνα με τους (Hosseini & Verma, 2018) στην περίπτωση της μεταφοράς ΕΦ στη διαδρομή l , με δεδομένο επίπεδο εμπιστοσύνης α (0,1), ως CVaR της επικινδυνότητας R^l ορίζεται :

$$CVaR_\alpha^l = \text{ο μέσος από την } \alpha - \text{ουρά της κατανομής του } R^l$$

όπου ως α – ουρά της κατανομής του R^l εννοείται αυτή με αθροιστική συνάρτηση κατανομής

$$F^{aR^l}(\beta) = 0, \text{ όταν } \beta \leq VaR_\alpha^l \text{ και } F^{aR^l}(\beta) = (F^{R^l}(\beta) - \alpha) / (1 - \alpha) \text{ όταν } \beta \geq VaR_\alpha^l$$

Το μέγεθος της Δεσμευμένης Αξίας -σε- Κίνδυνο, CVaR μπορεί να ποσοτικοποιήσει και να λάβει υπόψη της τον εκτεθειμένο πληθυσμό σε κίνδυνο στη δυσμενή ουρά

της κατανομής. (Toumazis, et al., 2013). Πράγματι το πρόβλημα ελαχιστοποίησης της CVaR, κωδικοποιείται ως εξής:

$$CVaR_{\alpha}^* = \min CVaR_{\alpha}^f, \text{ όταν:}$$

- $CVaR_{\alpha}^f = C_{(r)} + f^r / (1-\alpha)$
- $f^r = \min P'_{(r)} X$
- $r = 1, 2, 3, \dots, M$
- $P'_{(r)} X = \sum (\sum p_k (c_k - C_r) x_k + \sum p_{ij} (c_{ij} - C_r) x_{ij})$,

το οποίο $P'_{(r)} X$ εκφράζει την ενσωμάτωση του εκτεθειμένου σε κίνδυνο πληθυσμού στη δυσμενή ουρά της κατανομής μέσω των διαφορών των επιπτώσεων ατυχήματος ($c_k - C_r$) και ($c_{ij} - C_r$), όπου c_k η επίπτωση (και άρα ο εκτεθειμένος πληθυσμός) εξαιτίας ενός ατυχήματος βαγονιού μεταφοράς ΕΦ σε σταθμό μεταφόρτωσης k , c_{ij} η επίπτωση (και άρα ο εκτεθειμένος πληθυσμός) εξαιτίας ενός ατυχήματος βαγονιού μεταφοράς ΕΦ σε τμήμα διαδρομής ij , $C_{r,t}$ η t -ιοστή μικρότερη τιμή επίπτωσης στο σύνολο $c_k \cup c_{ij}$. και p_k, p_{ij} οι αντίστοιχες πιθανότητες ατυχήματος HAZMAT σε σταθμό μεταφόρτωσης k και σε τμήμα διαδρομής ij .

Οι (Hosseini & Verma, 2018) επιλύουν το πρόβλημα ελαχιστοποίησης ομοίως με την μεθοδολογία που ακολουθήθηκε από τους ίδιους στο (Hosseini & Verma, 2017) και περιγράφηκε παραπάνω. Χρησιμοποιείται ο αλγόριθμος εύρεσης συντομότερης διαδρομής του Dijkstra (Ντάϊκστρα) και οι ίδιες παραδοχές και μοντέλα υπολογισμού των πιθανοτήτων ατυχήματος και εκτεθειμένου σε κίνδυνο πληθυσμού, διαμόρφωσης τραίνου ανάλογα με τον όγκο ΕΦ που μεταφέρεται.

Από τις επιλύσεις του προβλήματος και τον υπολογισμό της Δεσμευμένης Αξίας –σε- Κίνδυνο CVaR για την ίδια υπόθεση εργασίας που παρουσιάζεται στο (Hosseini & Verma, 2017), προκύπτει ότι το προτεινόμενο μέγεθος CVaR γενικά υπερτερεί του μεγέθους VaR, καθώς απαλοίζει τις αδυναμίες του. (i) Συγκεκριμένα οι τιμές της CVaR είναι πάντα μεγαλύτερες του μηδενός σε αντίθεση με τις τιμές της VaR που σε πολλές περιπτώσεις, κυρίως χαμηλού επιπέδου εμπιστοσύνης, ήταν μηδενικές. (ii) Επιπλέον η VaR αποτυγχάνει να συλλάβει πληροφορία σχετικά με τον πρόσθετο πληθυσμό που είναι εκτεθειμένος στην επίπτωση ατυχήματος ακόμα και όταν η πιθανότητα του ατυχήματος είναι πολύ μικρή, με αποτέλεσμα να αδυνατεί να δώσει αποτελέσματα για καταστροφικά γεγονότα κατά την μεταφορά HAZMAT. Ο περιορισμός αυτός εξαλείφεται με την χρήση της CVaR. (iii) Τα αποτελέσματα των επιλύσεων δηλώνουν ότι το μοντέλο της Δεσμευμένης Αξίας –σε- Κίνδυνο CVaR, για πολύ υψηλό επίπεδο εμπιστοσύνης, ενσωματώνει την αποστροφή σε κίνδυνο αφού επιλέγει ασφαλέστερες και μεγαλύτερες διαδρομές περιλαμβάνοντας περιφερειακούς σταθμούς μεταφόρτωσης και περιφερειακά τμήματα διαδρομών του δικτύου. Συμπερασματικά το μέγεθος της

Δεσμευμένης Αξίας –σε- Κίνδυνο CVaR δίνει πιο ευδιάκριτα αποτελέσματα σε σχέση με το μέγεθος της Αξίας –σε-Κίνδυνο σε ότι αφορά την επιλογή της βέλτιστης διαδρομής μεταφοράς ΕΦ με κριτήριο την αποστροφή κινδύνου.

4.4. Συμπεράσματα σχετικά με τις μεθοδολογίες εκτίμησης επικινδυνότητας σιδηροδρομικής μεταφοράς επικίνδυνων φορτίων

Από την παρουσίαση των μεθοδολογιών των ενότητων 4.1,4.2,4.3 που αφορούν στην εκτίμηση της επικινδυνότητας της σιδηροδρομικής μεταφοράς HAZMAT, εξάγονται τα παρακάτω συμπεράσματα σχετικά με τις ομοιότητες ή διαφορές τους, και τα πιθανά πλεονεκτήματα ή κενά τους:

- 1.** Η κεντρική μεθοδολογία της ενότητας 4.1 αποτελεί μια διακριτή πρόταση εκτίμησης επικινδυνότητας διότι: (i) ενσωματώνει τους αιτιώδεις παράγοντες των ατυχημάτων στην ανάπτυξη μιας σύνθετης παραμέτρου που λαμβάνει υπόψη την αλληλουχία των γεγονότων που οδηγούν στη διαρροή των επικίνδυνων φορτίων από πολλαπλές πηγές (ii) λαμβάνει υπόψη τη σύνθεση και το μέγεθος της αμαξοστοιχίας στον υπολογισμό της επικινδυνότητας. Παρ' αυτά παρουσιάζει ελλείψεις: (i) προς την ακριβή εκτίμηση της επικινδυνότητας εντός των εμπορευματικών σταθμών αφού δεν λαμβάνει υπόψη τη παραμονή του φορτίου (ii) δεν λαμβάνει υπόψη σιδηροδρομικά ατυχήματα που δεν σχετίζονται με εκτροχιασμό(π.χ συγκρούσεις)
- 2.** Η πλειοψηφία των αναφερόμενων ερευνών και αναλύσεων αναζητά τη συσχέτιση μεταξύ της μεταφορικής επικινδυνότητας και : (i) του μήκους του τραίνου (ii) της θέσης που το φορτίο HAZMAT λαμβάνει στην σύνθεση της αμαξοστοιχίας (iii) της ταχύτητας των τρενών (iv) της αστοχίας της επιδομής λόγω ηλικίας και φθοράς της επιδομής, των χαρακτηριστικών του τροχαίου υλικού, της συντήρησης δικτύου, (iv) του εκτροχιασμού της αμαξοστοιχίας
- 3.** Στην πλειοψηφία τους οι έρευνες για την προσέγγιση της πιθανότητας ατυχήματος με διαρροής ΕΦ διερευνούν και υιοθετούν την αλληλουχία των πιθανοτήτων των επιμέρους γεγονότων δηλαδή του εκτροχιασμού του τραίνου, του εκτροχιασμού του βαγονιού HAZMAT και της διαρροής του ΕΦ. Παράλληλα εξετάζουν τις αιτίες που οδηγούν στον εκτροχιασμό (π. χ

ταχύτητα τραίνου, ηλικία επιδομής, πρόγραμμα επιθεωρήσεων δικτύου) και τις ενσωματώνουν στο μοντέλο εκτίμησης επικινδυνότητας προκειμένου να παραχθούν συμπεράσματα.

4. Οι περισσότερες έρευνες υπολογίζουν την μεταφορική επικινδυνότητα ΕΦ, θέτοντας ως σενάριο ατυχήματος τη διαρροή χλωρίου ή άλλων παρόμοιων δηλητηριωδών αερίων τα οποία όταν διαρρέουν διαχέονται ως αεροσωματίδια σε πολύ μακρινές αποστάσεις προκαλώντας τοξική μόλυνση.
5. Από την ανασκόπηση της πρόσφατης βιβλιογραφίας διαπιστώνεται η προσπάθεια των ερευνών να μοντελοποιήσουν τη βέλτιστη ισορροπία (trade off) μεταξύ επικινδυνότητας και κόστους μεταφοράς HAZMAT. Το κόστος συνήθως συσχετίζεται με τον χρόνο παράδοσης και την απώλεια του χρόνου (είτε λόγω συμφόρησης, είτε λόγω συμβάντος). Στο πλαίσιο αυτό οι έρευνες έχουν διευρύνει το υπό μελέτη πεδίο τους και εξετάζουν πέρα από μια διαδρομή, συνήθως το σιδηροδρομικό δίκτυο μιας χώρας.
6. Άλλο ένα κοινό πεδίο έρευνας των πιο πρόσφατων προτάσεων, είναι ο υπολογισμός της επικινδυνότητας εντός των εμπορευματικών σταθμών και η απεικόνιση του χρόνου παραμονής εντός (λόγω προγραμματισμού ή συμφόρησης) ως στοιχείο αύξησης του κόστους και της επικινδυνότητας.
7. Το σύνολο των προτεινόμενων μελετών χρησιμοποιούν ως εργαλείο μοντελοποίησης των προτάσεων τους τις μαθηματικές μεθόδους βελτιστοποίησης και ελαχιστοποίησης τις οποίες κωδικοποιούν σε δι-επιπεδιακό (δύο παραμέτρων) πρόγραμμα μέσω ευρετικών, στοχαστικών αλγορίθμων.
8. Η πλειοψηφία των ερευνητών κάνει χρήση λογισμικών προσομοίωσης και υπολογισμού επιπτώσεων ατυχημάτων από διαρροή επικίνδυνης ουσίας (π.χ. ALOHA) για τον υπολογισμό της ζώνης επιρροής του ατυχήματος καθώς και λογισμικών γεωγραφικών πληροφοριακών συστημάτων (π.χ. ArcGIS) για τον υπολογισμό του εκτεθειμένου πληθυσμού (και υποδομής) εντός της ζώνης επιρροής.
9. Σχετικά με τα μεγέθη VaR και CVar που παρουσιάστηκαν επισημαίνεται ότι καταρχήν ξεπερνούν την ουδέτερη φύση των υπολοίπων μεγεθών επικινδυνότητας και εκφράζουν την αποστροφή στον κίνδυνο, δηλαδή την επιλογή του αρμόδιου λήψης απόφασης να αποφασίσει σχετικά με την παραγωγή εναλλακτικών διαδρομών όταν η πρώτη έχει ήδη φτάσει το ανώτερο επίπεδο επικινδυνότητας που έχει τεθεί. Παρ' αυτά το μέγεθος VaR παρουσιάζει σχετικούς περιορισμούς στη χρήση διότι αγνοεί εξ ορισμού την ουρά της αθροιστικής συνάρτησης κατανομής και με αυτόν τον τρόπο την πηγή των πολύ καταστροφικών ατυχημάτων, πρόβλημα που ξεπερνάει το μέγεθος CVar. Σημειώνεται ότι τα μεγέθη αυτά έχουν

εφαρμογή και νόημα σε σχετικά πυκνά σιδηροδρομικά δίκτυα όπου είναι δυνατή η επιλογή εναλλακτικών διαδρομών.

4.5. Οδική μεταφορά επικίνδυνων φορτίων

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζεται η κεντρική μεθοδολογία εκτίμησης επικινδυνότητας κατά την μεταφορά HAZMAT μέσω του οδικού δικτύου, με τις σχετικές αναφορές στις ερευνητικές προτάσεις της διεθνούς βιβλιογραφίας. Σημειώνεται ότι η εν λόγω μεθοδολογία βασίζεται στην μέθοδο υπολογισμού της επικινδυνότητας όπως προτάθηκε από τους (Erkut & Verter, 1998), (Saccomanno, et al., 1990). Η παρούσα κεντρική μεθοδολογία παρουσιάστηκε από τους (Nathanail, et al., 2010) και (Nathanail, 2008). Η ενότητα αυτή ακολουθεί τη δομή της ενότητας 4.1.

4.5.1 Ανάλυση ιστορικών δεδομένων ατυχημάτων

Η οδική μεταφορά των επικίνδυνων φορτίων στην πλειοψηφία πραγματοποιείται μέσω των βαρέων φορτηγών και συρόμενων οχημάτων (cargo tank trucks -CTT). Η ανατροπή των βαρέων οχημάτων που οδηγεί στη διαρροή του επικίνδυνου εμπορεύματος (κατά πλειοψηφία του υγρού καυσίμου λχ βενζίνη, πετρέλαιο) είναι η κύρια αιτία θανάσιμων επιπτώσεων των συμβάντων αυτών. Στη διεθνή βιβλιογραφία συναντάται πληθώρα ερευνών που αφορούν στην στατιστική ανάλυση ιστορικών δεδομένων συμβάντων και εξαγουν ενδιαφέροντα συμπεράσματα σχετικά με τους παράγοντες που επηρεάζουν την πιθανότητα ατυχήματος με την εμπλοκή βαρέως οχήματος μεταφοράς HAZMAT και τη διαρροή του υλικού.

1. Ενδεικτικά αναφέρεται η αναφορά των (McKnight & Bahoulth, 2009) οι οποίοι ερευνώντας 239 ατυχήματα ανατροπής βαρέων οχημάτων στις ΗΠΑ, προέκυψε ότι περίπου τα μισά ατυχήματα οφείλονταν στην αστοχία των οδηγών να περιορίσουν την ταχύτητα του οχήματος στις στροφές του δικτύου, στα χαρακτηριστικά του φορτίου, στην επιφάνεια του οδοστρώματος και σε συνθήκες αλληλεπίδρασης.

2. Στην έρευνα που διεξήγαγαν οι (Shen, et al., 2014) μεταξύ 708 ατυχημάτων περιόδου 2004-2011 στην Κίνα, προέκυψε ότι το 73,8% των ατυχημάτων οφείλονταν σε ανθρώπινο λάθος που οδήγησε σε ανατροπή του

οχήματος (σε ποσοστό 29,10%) είτε σε πορεία εκτός δρόμου(σε ποσοστό 16,67%) είτε σε σύγκρουση (13,28%).

4.5.2 Εκτίμηση πιθανότητας ατυχήματος με εμπλοκή οχήματος που μεταφέρει επικίνδυνα φορτία και διαρροής ΕΦ

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται μεθοδολογίες εκτίμησης της πιθανότητας συμβάντος με εμπλοκή οχήματος οδικής μεταφοράς επικινδυνων φορτίων που θα οδηγήσει στη διαρροή του φορτίου. Στη διεθνή βιβλιογραφία εντοπίζεται πλήθος μελετών που σημειώνουν τις αβεβαιότητες και παγίδες στην εκτίμηση των ζητούμενων πιθανοτήτων κυρίως εξαιτίας έλλειψης διαθέσιμων ιστορικών δεδομένων ατυχημάτων. Από την άλλη μεριά πολλές έρευνες επικεντρώνονται σε μεθόδους προσέγγισης του κενού αυτού. Αναλυτικότερα:

1. Οι (Harwood, et al., 1993) περιέγραψαν μια γενική διαδικασία στην εκτίμηση ποσοστών ατυχημάτων βαρέων οχημάτων ως συνάρτηση του τύπου του οδικού δικτύου (αυτοκινητόδρομος, πρωτεύον επαρχιακό, δίκτυο κλπ.) κάνοντας χρήση επίσημων στοιχείων όπως φόρτους, ατυχήματα και γεωμετρικά χαρακτηριστικά του δικτύου. Για την εκτίμηση των πιθανοτήτων διαρροής χρησιμοποιήθηκαν επίσημα στοιχεία των ατυχημάτων βαρέων οχημάτων, υπογραμμίζοντας γενικά τις αβεβαιότητες που πρέπει να παραμετροποιηθούν προκειμένου να ομαλοποιηθεί ο συνδυασμός ελλιπών δεδομένων.

2. Οι (Iranitalab & Khattak, 2019a) προσφάτως (2018) κάνοντας χρήση των αναφορών των ατυχημάτων της περιόδου 2010- 2016 από την Νεμπράσκα (Nebraska) και το Κάνσας (Kansas) των ΗΠΑ έθεσαν στόχο την ταυτοποίηση και την ποσοτικοποίηση πληθώρα παραγόντων στην πιθανότητα ανατροπής και διαρροής HAZMAT κατά την κρούση βαρέων οχημάτων και την ανάπτυξη εργαλείων πρόβλεψης των δύο αυτών πιθανοτήτων (ανατροπής φορτηγού και διαρροής υλικού). Στο μοντέλο αυτό η ανατροπή και η διαρροή ορίζονται ως εξαρτημένες μεταβλητές οι οποίες επηρεάζονται από μια σειρά ανεξάρτητων μεταβλητών σχετικών με τα χαρακτηριστικά της κρούσης, των φορτηγών, του οδικού δικτύου καθώς και καιρικά και οδηγικά χαρακτηριστικά. Ο σχεδιασμός βασίζεται στη μέθοδο της λογιστικής παλινδρόμησης βασιζόμενη στο Μοντέλο Μέσων Όρων κατά Baye (Bayesian Model Averaging- BMA) Τα συμπεράσματα της ανάλυσης έδειξαν ότι το ποσοστό της διαρροής επηρεάζεται κατά κύριο λόγο από την ανατροπή του βαρέως οχήματος και σε πολύ μικρότερο ποσοστό από την ύπαρξη αλληλεπίδρασης στο ατύχημα. Καμμία άλλη ανεξάρτητη μεταβλητή

δεν επηρεάζει την εξέλιξη σε διαρροή ή όχι του υλικού. Αντιθέτως μια σειρά μεταβλητών αυξάνουν ή σχετίζονται με την πιθανότητα ανατροπής του οχήματος κατά την κρούση του, όπως το σημείο κρούσης του οχήματος (η δεξιά πλευρά αυξάνει τις πιθανότητες ανατροπής) η μη σύγκρουση με άλλο όχημα, η εμπλοκή αντικειμένου, το μεικτό βάρος οχήματος άνω των 26.000 λίβρων, το επιτρεπτό όριο ταχύτητας, η ύπαρξη έντονων ανέμων, το ημίφως της αυγής ή του σούρουπου, το χωμάτινο οδόστρωμα και η ύπαρξη λάσπης (σε σχέση με την ασφαλτόστρωση). Τέλος οι παράγοντες που μειώνουν την πιθανότητα ανατροπής σε μικρότερο βαθμό και με φθίνουσα σειρά είναι η ύπαρξη τριών και άνω λωρίδων και ο τύπος του οχήματος (τράκτορας και ημιρυμουλκούμενο).

3. Παρομοίως οι (Ma, et al., 2019) υποστηρίζουν ότι η Μέθοδος Ανάλυσης Αιτιώδους Συνάφειας για ατυχήματα μπορεί να παράξει τον μηχανισμό ατυχήματος μέσα από ένα μεγάλο αριθμό τυπικών ατυχημάτων, προβάλλοντας τους σημαντικούς παράγοντες που επηρεάζουν την εκδήλωση ατυχήματος ή τον συνδυασμό παραγόντων. Κατά επέκταση προτείνουν το «Δίκτυο του Baye (Bayesian network)» για τον υπολογισμό της μεταγενέστερης πιθανότητας (posterior probability) των παραγόντων επικινδυνότητας κάτω από συνθήκες ατυχήματος προκειμένου να προκύψουν (με τη χρήση αλγορίθμου αναμενόμενης μεγιστοποίησης) οι πιο πιθανοί παράγοντες ή συνδυασμός τους που προκαλούν ατυχήματα. Τα συμπεράσματα της έρευνας μπορούν να βοηθήσουν τις αρμόδιες αρχές προκειμένου να περιορίσουν τη συχνότητα ατυχημάτων με συμπλοκή βαρέων οχημάτων.

4. Οι (Nathanail, et al., 2010) στην μελέτη εκτίμησης επικινδυνότητας κατά τη μεταφορά ΕΦ εντός των οδικών σηράγγων των Ελληνικών αυτοκινητοδρόμων και οι (Kazantzzi, et al., 2011) προτείνουν ότι η πιθανότητα P_i ατυχήματος διαρροής επικίνδυνου φορτίου οχήματος μεταφοράς ΕΦ σε ένα οδικό τμήμα i υπολογίζεται από την εξίσωση:

$$P_i = AR_{DG}^i \times P_i(RL/A) \times d_i \quad (1)$$

όπου AR_{DG}^i είναι ο δείκτης ατυχημάτων (ή η συχνότητα) με εμπλοκή βαρέων οχημάτων ΕΦ στο τμήμα i (σε ατύχημα ανά όχημα-χιλιόμετρο), $P_i(RL/A)$ η εξαρτημένη πιθανότητα διαρροής δεδομένου του ατυχήματος στο τμήμα i και d_i το μήκος του τμήματος i .

Επίσης στην περίπτωση όπου δεν διατίθενται ιστορικά δεδομένα ατυχημάτων οι (Nathanail, et al., 2010) συστήνουν την παραδοχή ότι το ποσοστό ατυχημάτων με βαρέα οχήματα HAZMAT να ισούται με το ποσοστό ατυχημάτων βαρέων οχημάτων γενικώς. Σε αυτή την περίπτωση ο δείκτης ατυχημάτων (ή , η

συχνότητα) AR_{DG} εμπλοκής οχήματος με ΕΦ σε ατύχημα υπολογίζεται (σε ατυχήματα ανά οχηματοχιλιόμετρα), ως εξής:

$$AR_{DG} = R \times \chi_{DG} \times L \times EMHK \times 365 \quad (2)$$

- όπου R ο δείκτης ατυχημάτων οδού για το τμήμα του αυτοκινητοδρόμου ή της σήραγγας (σε ατυχήματα ανά οχηματοχιλιόμετρα)
- χ_{DG} το ποσοστό των οχημάτων με ΕΦ στο συνολικό φόρτο (%)
- L το μήκος του αυτοκινητοδρόμου (σε χιλιόμετρα)
- EMHK Ετήσια Μέση Ημερήσια Κυκλοφορία (σε οχήματα ανά ημέρα)

Σχετικά με το ποσοστό των φορτηγών οχημάτων HAZMAT και στην περίπτωση έλλειψης ακριβέστερων στοιχείων μπορεί να γίνει η παραδοχή 2% των συνολικών βαρέων οχημάτων, όπως οι ερευνητές ανακαλούν από τη διεθνή βιβλιογραφία.

Η πιθανότητα διαρροής επικίνδυνων φορτίων εξαιτίας ατυχήματος με εμπλοκή οχήματος HAZMAT, εξαρτάται από τον τύπο του επικίνδυνου υλικού που μεταφέρεται και το σενάριο επίπτωσης που προκαλεί (π.χ. BLEVE σε φορτίο φιαλών υγραερίου, λίμνη φωτιάς βενζίνης κλπ.). Όπως έχει ήδη αναφερθεί στην ενότητα 3.3.2 ο Παγκόσμιος Οργανισμός Οδικών δικτύων PIARC για την περίπτωση εκτίμησης επικινδυνότητας παρουσιάζει έντεκα πιθανά σενάρια ατυχημάτων. Επιπλέον προτείνει τιμές πιθανότητας εμφάνισης των τελικών σεναρίων εξαιτίας οδικού ατυχήματος, (βλέπε Πίνακας 4.3).

Επιπλέον αναπτύχθηκαν άλλες εναλλακτικές μέθοδοι εκτίμησης των πιθανοτήτων διαρροής επικίνδυνων φορτίων στη περίπτωση ατυχήματος όπως η θεώρηση στατιστικών συμπερασμάτων, η χρήση δέντρου σφάλματος και συμβάντος σε συνδυασμό με αναλυτικές τεχνικές και τεχνικές προσομοίωσης (Monte Carlo), ο υποκειμενικός υπολογισμός και η Μπευζιανή στατιστική ανάλυση (Bayesian model)

Πίνακας 4.3: Πιθανότητες εμφάνισης τελικών σεναρίων δεδομένης της εμφάνισης οδικού ατυχήματος (πηγή: (Nathanail, et al., 2010))

BLEVE σε φορτίο φιαλών υγραερίου	$4,3 \cdot 10^{-4}$	$8,0 \cdot 10^{-4}$	$1,7 \cdot 10^{-3}$	$5,1 \cdot 10^{-3}$
Λίμνη φωτιάς βενζίνης	$2,7 \cdot 10^{-3}$	$4,5 \cdot 10^{-3}$	$2,8 \cdot 10^{-3}$	$2,0 \cdot 10^{-2}$
Έκρηξη νέφους ατμών βενζίνης	$2,7 \cdot 10^{-4}$	$4,5 \cdot 10^{-4}$	$2,8 \cdot 10^{-4}$	$2,0 \cdot 10^{-3}$
Διαρροή χλωρίου χύδην φορτίου	$3,1 \cdot 10^{-2}$	$5,4 \cdot 10^{-2}$	$3,1 \cdot 10^{-2}$	$5,4 \cdot 10^{-2}$
BLEVE φορτίου χύδην υγραερίου	$2,3 \cdot 10^{-4}$	$4,2 \cdot 10^{-4}$	$2,8 \cdot 10^{-4}$	$2,0 \cdot 10^{-3}$

Περιγραφή	Περιοχή οδού		Περιοχή σήραγγας	
	Αστική	Αγροτική	Αστική	Αγροτική
Έκρηξη νέφους ατμών φορτίου χύδην υγραερίου	$2,3 * 10^{-4}$	$4,2 * 10^{-4}$	$2,8 * 10^{-4}$	$2,0 * 10^{-3}$
Πίδακας φωτιάς φορτίου χύδην υγραερίου	$2,3 * 10^{-3}$	$4,2 * 10^{-3}$	$2,8 * 10^{-3}$	$2,0 * 10^{-2}$
Διαρροή αμμωνίας χύδην φορτίου	$3,1 * 10^{-2}$	$5,4 * 10^{-2}$	$3,1 * 10^{-2}$	$5,4 * 10^{-2}$

5. Οι (Button & Reilly, 2000) παράγουν *Εξισώσεις Πυκνότητας Πιθανότητας* (Probability Density Functions) για να υπολογίζουν το αναμενόμενο ποσοστό διαρροής και συμβάντος φωτιάς οχημάτων μεταφοράς HAZMAT, προκειμένου να αντιμετωπιστούν οι αβεβαιότητες των ελλειπών δεδομένων ατυχημάτων που διαθέτουν συνολικά. Μάλιστα γίνεται χρήση προσομοίωσης Monte Carlo στις εισαγόμενες μεταβλητές. Τελικά τα αποτελέσματα παρουσιάζονται ανά τύπο υλικού και τελικά ανά σενάριο συμβάντος (για την περίπτωση σύγκρουσης ή ανατροπής του οχήματος, μεγάλου ή μικρού φορτίου και συνδυασμούς αυτών).

4.5.3 Εκτίμηση και ποσοτικοποίηση επιπτώσεων ατυχήματος

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζεται η εκτίμηση της επίπτωσης C (consequence) του ατυχήματος από εμπλοκή βαρέως οχήματος μεταφοράς επικίνδυνου φορτίου και διαρροή του φορτίου. Ως επίπτωση εννοείται η ανεπιθύμητη συνέπεια του ατυχήματος στο περιβάλλοντα χώρο επίδρασης του, εννοώντας την επίπτωση στους ανθρώπους, στο υλικό και φυσικό περιβάλλον και στην υποδομή που περικλείονται εντός περιοχής επίδρασης του ατυχήματος. (Erkut & Verter, 1998) (Erkut & V.Verter, 1995b)

Η Διαδικασία υπολογισμού των επιπτώσεων του ατυχήματος περιλαμβάνει καταρχήν (i) την εξακρίβωση της κατηγορίας και του όγκου του επικίνδυνου φορτίου που μεταφέρεται στο υπό μελέτη οδικό τμήμα (ii) τον προσδιορισμό των σεναρίων επιπτώσεων ανάλογα των ιδιοτήτων και της ποσότητας των μεταφερόμενων επικίνδυνων φορτίων (iii) υπολογισμό της περιοχής επίδρασης του ατυχήματος αρχικά σημειακά και κατά μήκος της διαδρομής (iv) τον προσδιορισμό του εκτεθειμένου πληθυσμού ή και υλικού και φυσικού περιβάλλοντος εντός της περιοχής επίδρασης του ατυχήματος.

4.5.3.1 Εξακρίβωση της κατηγορίας και του όγκου των επικίνδυνων φορτίων

Οι (Nathanail, et al., 2010) στη μελέτη τους περί εκτίμησης επικινδυνότητας εντός των Ελληνικών οδικών σηράγγων των αυτοκινητοδρόμων λαμβάνουν υπόψη τους τις προτεινόμενες παραδοχές του ΡΙΑRC σχετικά με τον τύπο των επικίνδυνων φορτίων που πρέπει να εξεταστεί, όπως παρουσιάστηκαν στον πίνακα 3.1, κεφάλαιο 3. Τα φορτία αυτά θεωρούνται αντιπροσωπευτικά των κλάσεων στις οποίες ανήκουν, καθώς επίσης και ότι οι επιλεχθείσες κλάσεις αντιπροσωπεύουν το σύνολο των επικίνδυνων φορτίων κλάση 2: υγραέριο, αμμωνία, χλώριο, Διοξείδιο του Άνθρακα, κλάση 3: Βενζίνη, κλάση 6.1: Ακρολεΐνη).

Άλλοι ερευνητές περιορίζονται στη μελέτη ατυχημάτων από τη μεταφορά καυσίμων, το οποίο αποτελεί και το πιο διαδεδομένο μεταφερόμενο επικίνδυνο φορτίο (Kazantzi, et al., 2011)

Σε κάθε περίπτωση απαραίτητα δεδομένα για την εκτίμηση της επικινδυνότητας κατά τη μεταφορά HAZMAT, αποτελεί η εξακρίβωση (ή η υπόθεση) των διερχόμενων επικίνδυνων ουσιών, η ποσότητα και τα χαρακτηριστικά τους.

4.5.3.2 Προσδιορισμός σεναρίου επιπτώσεων ατυχήματος

Τα σενάρια επιπτώσεων ατυχήματος που λαμβάνονται υπόψη σε κάθε περίπτωση μελέτης εξαρτώνται από την παραδοχή των ΕΦ που μεταφέρονται. Γενικά τα πιθανά φαινόμενα που ακολουθούν τη διαρροή/διαφυγή επικίνδυνων ουσιών (όπως έχουν ήδη περιγραφεί αναλυτικά στην ενότητα 3.3.1) είναι:

- Hot BLEVE -Έκρηξη φωτιάς αναβράζοντος υγρού διαστελλόμενου αερίου.
- Cold BLEVE- Έκρηξη αερίου νέφους.
- Flash fire-Πίδακας Φωτιάς.
- Pool fire -Λίμνη Φωτιάς
- Διαρροή τοξικού αερίου

Για την ανάλυση κάθε σεναρίου επίπτωσης οι ερευνητές χρησιμοποιούν μαθηματικά μοντέλα προσομοίωσης της δυναμικής συμπεριφοράς των υλικών προκειμένου να εκφραστεί με μαθηματικούς όρους η επίπτωση των παραπάνω φαινομένων.

4.5.3.3 Υπολογισμός ζώνης επιρροής ατυχήματος

1. Η (Nathanail, 2008) προτείνει μια μεθοδολογία αξιολόγησης εναλλακτικών διαδρομών για την οδική μεταφορά ΕΦ με κριτήρια την επικινδυνότητα εξαιτίας ατυχήματος, το μεταφορικό κόστος και το κόστος που θα προκληθεί στους διαχειριστές του οδικού δικτύου. Η επικινδυνότητα υπολογίζεται ως προς τις επιπτώσεις στον εκτιθέμενο πληθυσμό αλλά και το εκτιθέμενο φυσικό και υλικό περιβάλλον. Επίσης η μελέτη αυτή προτείνει μια υπολογιστική πλατφόρμα για την αξιολόγηση εναλλακτικών διαδρομών, φιλική στη χρήση, προκειμένου να δύναται η χρήση της από τους αρμόδιους υπεύθυνους λήψης αποφάσεων.

Στην πρόταση της αυτή ως σενάρια επίπτωσης εξετάζονται:

i. Η διασπορά σύννεφου ατμών (vapour cloud dispersion) η οποία εκτιμάται βάση του μοντέλου Γκαουσιανής διασποράς αερίων, όπου η συγκέντρωση $C(x,y,z,t)$ υπολογίζεται από την σχέση:

$$C(x,y,z,t) = \frac{m}{(2\pi)^{3/2} \sigma_x \sigma_y \sigma_z} \exp\left(-\frac{(x-u_w t)^2}{2\sigma_x^2}\right) \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right) \left[\exp\left(-\frac{(z-h)^2}{2\sigma_z^2}\right) + \exp\left(-\frac{(z+h)^2}{2\sigma_z^2}\right) \right]$$

όπου m : η μάζα του υλικού, h : το ύψος της μάζας από το έδαφος, u_w : η ταχύτητα του αέρα

ii. Η φωτιά αερίου νέφους (flash fire)

Εξετάζεται η δυσμενέστερη περίπτωση που το αέριο νέφος αναφλεχθεί (και όπου η ελάχιστη απόσταση ασφαλείας θα είναι σαφώς μεγαλύτερη από αυτήν στην απλή περίπτωση διασποράς, εξαιτίας του φαινομένου της θερμικής ακτινοβολίας από την μάζα του φλεγόμενου αερίου). Η δόση θερμικής ακτινοβολίας δίνεται από τον τύπο (The Netherlands organization of applied scientific research, 1998), (Lees, 2012) (Considine, 1984)

$$D_o = \dot{q}^{\frac{4}{3}} \cdot t$$

Όπου

D_o , η δόση θερμικής ακτινοβολίας (W/m^2)^{4/3} * s

\dot{q} , το εκπεμπόμενο θερμικό φορτίο (W/m^2)

t , η διάρκεια έκθεσης στη θερμική ακτινοβολία (s)

Γίνεται η υπόθεση ότι η διάρκεια έκθεσης στην θερμική ακτινοβολία είναι ίση με την διάρκεια του φαινομένου που δίνεται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$t = 4,5 * m0,33$$

όπου m, η μάζα του υλικού που αναφλέγεται (kg)

Η εκπεμπόμενη θερμική ακτινοβολία από το νέφος δίνεται από την εξίσωση:

$$\dot{q} = \frac{E}{A} * F * \tau_a$$

Όπου

\dot{q} , το εκπεμπόμενο θερμικό φορτίο (W/m²)

E , η επιφανειακή ακτινοβολούμενη ισχύς (W)

A , η επιφάνεια του νέφους προς την κατεύθυνση του δέκτη (m²)

F , συντελεστής μορφής (view factor)

τ_a , η διαπερατότητα της ατμόσφαιρας

Ισχύει $A < L_x * L_z$, άρα μπορεί να χρησιμοποιηθεί με ασφάλεια $A = L_x * L_z$

Η επιφανειακή ακτινοβολούμενη ισχύς υπολογίζεται από τη σχέση:

$$E = \dot{m} * \Delta H$$

Όπου

\dot{m} , ο ρυθμός καύσης του αερίου νέφους (kg/sec)

ΔH , η θερμότητα καύσης του υλικού (J/kg)

Ο ρυθμός καύσης \dot{m} του αερίου νέφους δίνεται από την εξίσωση:

$$\dot{m} = \frac{m}{t}$$

Ο συντελεστής μορφής προκύπτει από την εξίσωση:

$$F = \frac{1}{\pi S} \tan^{-1} \left(\frac{L}{\sqrt{S^2 - 1}} \right) + \frac{L}{\pi} \left[\frac{(a - 2S)}{S\sqrt{ab}} \tan^{-1} \sqrt{\frac{a(S-1)}{b(S+1)}} - \frac{1}{S} \tan^{-1} \sqrt{\frac{S-1}{S+1}} \right]$$

Όπου

$$a = (S+1)^2 + L^2$$

$$b = (S-1)^2 + L^2$$

$$S = \frac{R + L_y}{L_y}$$

$$L = \frac{\sqrt{(R + L_y)^2 + L_z^2}}{L_y}$$

R, η απόσταση της επιφάνειας του σύννεφου από τον δέκτη.

Για τον υπολογισμό της ελάχιστης ακτίνας ασφαλείας για κάθε μία από τις υπό μελέτη ουσίες, ακολουθείται η εξής μεθοδολογία:

- Θεωρώντας τον όγκο του νέφους περίπου κυβικό, από τον αρχικό όγκο υπολογίζονται τα L_x , L_y και L_z και κατόπιν ο συντελεστής μορφής ως συνάρτηση της ακτίνας R.
- Με την βοήθεια της εξίσωσης υπολογισμού επιφανειακής ακτινοβολούμενης ισχύος, παραπάνω, υπολογίζεται η επιφανειακή ακτινοβολούμενη ισχύς συναρτήσει της μάζας m, του αερίου νέφους.
- Η επιφάνεια A αποτελείται βασικά από το γινόμενο L_x επί L_z . Αντικαθιστώντας αυτήν, καθώς και τα παραπάνω στην εξίσωση εκπεμπόμενης θερμικής ακτινοβολίας και θέτοντας την διαπερατότητα της ατμόσφαιρας περίπου ίση με την μονάδα, η προαναφερθείσα εξίσωση καταλήγει σε μία της μορφής $\dot{q} = f(m, R)$.
- Για τον υπολογισμό της ελάχιστης απόστασης ασφαλείας από την άκρη του αερίου νέφους, λαμβάνεται υπόψη η επικίνδυνη δόση του HSE (I. Hymes, 1983) (Health and Safety Executive, UK) και η οποία είναι ίση με $1000 \text{ (W/m}^2\text{)}^{4/3} \cdot \text{s}$. Αντικαθιστώντας και την τιμή αυτή στην εξίσωση υπολογισμού δόσης θερμικής ακτινοβολίας, αυτή καταλήγει τελικά στην μορφή $R = f(m)$, οπότε με την βοήθεια αυτής μπορούν να προκύψουν οι αντίστοιχες αποστάσεις ασφαλείας για κάθε ουσία.

iii. Απεριόριστες εκρήξεις αερίου νέφους (unconfined vapor cloud explosion)

Από τις εκρήξεις παράγεται υπερπίεση που για τον υπολογισμό της χρησιμοποιείται το μοντέλο TNT ισοδύναμης μάζας (trinitro toluolion mass equivalent), όπως υποδεικνύεται βιβλιογραφικά (The Netherlands organization of applied scientific research, 1998) (Lees, 1996). Η υπερπίεση δίνεται από τον τύπο,

$$P_s = \frac{808 \cdot [1 + (z/4.50)^2]}{[1 + (z/0.048)^2]^{1/2} \cdot [1 + (z/0.32)^2]^{1/2} \cdot [1 + (z/1.35)^2]^{1/2}}$$

όπου:

p_s = Υπερπίεση (Pascal)

z = Σχετική απόσταση ($m/kg^{1/3}$)

Η υπερπίεση που παράγεται από εκρήξεις αερίου νέφους υπολογίζεται με την μέθοδο ισοδύναμης μάζας TNT (American Institute of Chemical Engineers, 1998) (American Institute of Chemical Engineers, 1998), (Papazoglou & Aneziris, 1999). Το μοντέλο της ισοδύναμης μάζας TNT βασίζεται στην υπόθεση ισοδύναμης συμπεριφοράς της εύφλεκτης ουσίας και του εκρηκτικού TNT, με βάση έναν συντελεστή απόδοσης a_e , ο οποίος έχει βρεθεί από πειράματα ότι έχει την τιμή 0,03.

$$W_{TNT} = a_e \cdot \frac{M \cdot DH_c}{DH_{TNT}}$$

όπου:

a_e = συντελεστής απόδοσης (εμπειρική τιμή, $a_e = 0,03$)
 DH_c = θερμότητα καύσης της εύφλεκτης ουσίας, J/kg
 DH_{TNT} = TNT ενέργεια ($4,6 \cdot 10^6$ J/kg)
 M = Μάζα της εύφλεκτης ουσίας που υπόκειται έκρηξη, kg
 W_{TNT} = ισοδύναμη μάζα TNT, kg
 X = απόσταση, m

όπου με την υπόθεση ότι $P_o = 14,5\text{psig}$ (The Netherlands organization of applied scientific research, 1998) και η ακτίνα R η απόσταση που συμβαίνει η έκρηξη, υπολογίζεται η ελάχιστη απόσταση ασφαλείας που το φαινόμενο επιδρά ή αλλιώς η ακτίνα της περιοχής επίδρασης.

iv. Φωτιά λίμνης εύφλεκτου υλικού(pool fire):

Η φωτιά λίμνης εύφλεκτου υγρού προκύπτει από ανάφλεξη υγρού καυσίμου, το οποίο έχει διαρρεύσει και έχει σχηματίσει λίμνη στο έδαφος. Το σχήμα της φωτιάς επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό από τις μετεωρολογικές συνθήκες, ειδικά την ταχύτητα του αέρα. Η διάρκεια μία λίμνης φωτιάς εξαρτάται από την διάρκεια της διαρροής και την ποσότητα του καυσίμου που έχει διαρρεύσει. Για την περίπτωση που παρουσιάζεται διαρροή εύφλεκτου υγρού και δημιουργία λίμνης φωτιάς, η ελάχιστη απόσταση ασφαλείας, R , από τη λίμνη αυτή θα δίνεται από την παρακάτω εμπειρική σχέση (Lees, 2012)

$$R = 21,7m^{0,38}$$

όπου m = η μάζα του υγρού (kg)

Η σχέση αυτή βασίζεται στην υπόθεση ότι ο χρόνος έκθεσης του ατόμου στην ακτινοβολία είναι ίσος με τον συνολικό χρόνο που διαρκεί η καύση της λίμνης. Ακόμα, λαμβάνονται ήπιες κλιματολογικές συνθήκες και ελάχιστης έως μηδενικής ισχύος αέρας.

v. Έκρηξη αναβράζοντος υγρού διαστελλόμενου αερίου (Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion BLEVE):

Το BLEVE είναι ένα φαινόμενο που παρουσιάζεται όταν ένα βυτίο με υγρό υπερθερμανθεί από φωτιά και το μέταλλο χάσει την αντοχή του και διαρρηχθεί. Εάν ξεπεραστεί το όριο αντοχής των βυτίων μπορεί να προκύψει το φαινόμενο του BLEVE. Η ελάχιστη απόσταση ασφαλείας, $R(m)$, από το φαινόμενο θα δίνεται από την παρακάτω σχέση (Lees, 2012):

$$R = 30t^{0,366} m^{0,306}$$

Όπου t ο χρόνος έκθεσης στο φαινόμενο (sec) και m η μάζα της ουσίας (kg)

Για τον χρόνο έκθεσης πρέπει να ισχύει $t < t_d$, όπου t_d είναι ο χρόνος που διαρκεί το φαινόμενο και ισούται με:

$$t_d = 4,5m^{0,33}$$

Η ακτίνα για την μέγιστη απόσταση ασφαλείας υπολογίζεται για $t = t_d$, επομένως η παραπάνω εξίσωση μετασχηματίζεται στην:

$$R = 52m^{0,427}$$

Από τα παραπάνω μοντέλα προκύπτουν οι περιοχές επιρροής των σεναρίων επιπτώσεων. Συνεπαγωγικά είναι δυνατός ο υπολογισμός του εκτεθειμένου πληθυσμού, του υλικού και φυσικού περιβάλλοντος που περικλείεται εντός των περιοχών επιρροών.

Ειδικά για τον εκτιθέμενο πληθυσμό το προτεινόμενο πρόγραμμα υπολογίζει το δείκτη πληθυσμού σύμφωνα με την εξίσωση:

$$N = P(R) \times V_{DG} \times L \times A_{YX}$$

όπου:

N	=	Δείκτης πληθυσμού (κατοίκων) στο δήμο
$P(R)$	=	Συχνότητα εμφάνισης ατυχημάτων με διαρροή ΕΦ στο δήμο (ατυχήματα ανά εκατομμύριο οχηματοχιλιόμετρα)
V_{DG}	=	Κυκλοφοριακός φόρτος οχημάτων με επικίνδυνα φορτία στο οδικό δίκτυο του δήμου (οχήματα ανά έτος)

L	=	Μήκος του τμήματος της διαδρομής που εντάσσεται μέσα στο δήμου
A_{YX}	=	Συνολικός πληθυσμός που βρίσκεται μέσα στην έκταση Y_X στο δήμου
Y_X	=	Ζώνη επιρροής του επικίνδυνου υλικού X

Στην παραπάνω σχέση, ο συνολικός πληθυσμός A_{YX} υπολογίζεται ίσος με το ποσοστό του πληθυσμού που αναλογεί στην ζώνη αυτήν, βάσει της πυκνότητας του πληθυσμού του δήμου.

2. Επίσης Οι (Nathanail, et al., 2010) παρουσιάζοντας μια πολύ αναλυτική προσομοίωση όλων των σεναρίων επιπτώσεων, στο μοντέλο που προτείνουν υπολογίζουν τις «δόσεις» θερμικής ακτινοβολίας, υπερπίεσης, θερμοκρασίας καπνού και συγκέντρωσης τοξικών αερίων που λαμβάνει ο εκτεθειμένος πληθυσμός κατά την εκδήλωση του ατυχήματος αναλόγως της απόστασης στην οποία βρίσκεται από το κέντρο δημιουργίας του κάθε σεναρίου. Με βάση μαθηματικά μοντέλα προσομοίωσης των σεναρίων υπολογίζονται:

- η ένταση της θερμικής ακτινοβολία (q'') σε διάφορες αποστάσεις (x) από το κέντρο του φαινομένου, στις περιπτώσεις των διαφόρων τύπων πυρκαγιών,
- η υπερπίεση (p^o) σε διάφορες αποστάσεις (x) από το κέντρο του φαινομένου, στις περιπτώσεις των εκρήξεων αερίου νέφους και των εκρήξεων αναβράζοντος υγρού διαστελλόμενου αερίου - BLEVE,
- η θερμοκρασία του καπνού (T) σε διάφορες αποστάσεις (x) από το κέντρο του φαινομένου,
- η συγκέντρωση (C) του μονοξειδίου του άνθρακα (CO) σε διάφορες αποστάσεις (x) από το κέντρο του φαινομένου, και
- οι συγκεντρώσεις (C) των τοξικών αερίων (αμμωνία, χλώριο, ακρολεΐνη) σε διάφορες αποστάσεις (x) από το κέντρο του φαινομένου.

Λεπτομερέστερη απεικόνιση των μοντέλων προσομοίωσης της διαρροής υγρού, σχηματισμού λίμνης υγρού, εξάτμιση λίμνης υγρού, διασποράς, θερμοκρασία καπνού, αέρια καύσης περιλαμβάνονται στην εν λόγω μελέτη.

Στην συνέχεια, με την βοήθεια της εξίσωσης Probit υπολογίζουν τα αντίστοιχα ποσοστά των θανάσιμων τραυματισμών (Committee for the prevention of disasters, 1997). Στόχος είναι να εκτιμηθεί ο δείκτης κοινωνικής διακινδύνευσης (societal risk) έτσι ώστε να απεικονίζεται καλύτερα η επίπτωση ενός ατυχήματος

στον εκτιθέμενο πληθυσμό. Ο συντελεστής Probit συσχετίζεται με το ποσοστό θανατηφόρων τραυματισμών σύμφωνα με τις οριακές τιμές που προσδιορίζονται στις Ευρωπαϊκές Οδηγίες 91/322/EU και 96/94/EU για τους εργάτες που Εκτίθενται σε χημικές φυσικές και βιολογικές ουσίες.

Στη συνέχεια περιλαμβάνεται ως απόσπασμα, για λόγους κατανόησης και πληρότητας, οι υπολογισμοί των επιπτώσεων των σεναρίων, όπως ακριβώς παρουσιάζονται στην πρόταση των (Nathanail, et al., 2010) :

i. Υπολογισμός θερμικής ακτινοβολίας για διάφορους τύπους πυρκαγιών

Σκοπός των επιλεγμένων μοντέλων είναι ο υπολογισμός της θερμικής ακτινοβολίας σε ένα αντικείμενο / στόχο και σε ορισμένη απόσταση από την φωτιά (The Institution of Chemical Engineers, 1989), (American Institute of Chemical Engineers, 1998) (American Institute of Chemicals Engineers, 1999). Η φωτιά μπορεί να είναι λίμνη φωτιάς, πίδακας φωτιάς ή σφαίρα φωτιάς που προκύπτει ως αποτέλεσμα της έκρηξης αναβράζοντος υγρού διαστελλόμενου αερίου (BLEVE).

Η τιμή της θερμικής ακτινοβολίας υπολογίζεται από μια σχέση η οποία έχει την παρακάτω μορφή:

$$q'' = f(F_f, m_h', \Delta H_c, x)$$

όπου:

q'' = Θερμική ακτινοβολία εκπεμπόμενη από την φωτιά (W/m^2)

F_f = Ποσοστό ακτινοβολούμενης θερμότητας από την επιφάνεια της φλόγας (%)

m_h' = Ρυθμός καύσης (kg/s)

ΔH_c = Θερμότητα καύσης (J/kg)

x = Απόσταση από την φωτιά (m)

Επίσης, η θερμική ακτινοβολία εξαρτάται από το γεωμετρικό σχήμα της πηγής και τον προσανατολισμό της πηγής και του στόχου.

ii. Υπολογισμός υπερπίεσης για διάφορους τύπους εκρήξεων

Η υπερπίεση p_s που παράγεται κατά την διάρκεια μιας έκρηξης αναβράζοντος υγρού διαστελλόμενου αερίου (BLEVE) δίνεται από την παρακάτω εξίσωση (American Institute of Chemical Engineers, 1998) (American Institute of Chemicals Engineers, 1999):

$$p_s = \frac{808 \cdot [1 + (z/4.50)^2]}{[1 + (z/0.048)^2]^{1/2} \cdot [1 + (z/0.32)^2]^{1/2} \cdot [1 + (z/1.35)^2]^{1/2}}$$

όπου:

p_s = Υπερπίεση (Pascal)

z = Σχετική απόσταση ($m/kg^{1/3}$)

Η υπερπίεση που παράγεται από εκρήξεις αερίου νέφους υπολογίζεται με την μέθοδο ισοδύναμης μάζας TNT (American Institute of Chemical Engineers, 1998), (Papazoglou & Aneziris, 1999) Το μοντέλο της ισοδύναμης μάζας TNT βασίζεται στην υπόθεση ισοδύναμης συμπεριφοράς της εύφλεκτης ουσίας και του εκρηκτικού TNT, με βάση έναν συντελεστή απόδοσης a_e , ο οποίος έχει βρεθεί από πειράματα ότι έχει την τιμή 0,03.

$$W_{TNT} = a_e \cdot \frac{M \cdot DH_c}{DH_{TNT}}$$

όπου:

a_e = συντελεστής απόδοσης (εμπειρική τιμή, $a_e = 0,03$)

DH_c = θερμότητα καύσης της εύφλεκτης ουσίας, J/kg

DH_{TNT} = TNT ενέργεια ($4,6 \cdot 10^6$ J/kg)

M = Μάζα της εύφλεκτης ουσίας που υπόκειται έκρηξη, kg

W_{TNT} = ισοδύναμη μάζα TNT, kg

X = απόσταση, m

Στην συνέχεια, από κατάλληλα διαγράμματα υπολογίζεται η τιμή της υπερπίεσης σε διάφορες αποστάσεις.

Επόμενο βήμα είναι ο υπολογισμός της δόσης που ο εκτεθειμένος πληθυσμός θα λάβει καθώς και οι θανάσιμοι τραυματισμοί ανάλογα με την δόση θερμικής ακτινοβολίας, υπερπίεσης, τοξικών αερίων ή έκθεσης σε υψηλές θερμοκρασίες:

iii. Θερμική ακτινοβολία

Ο τραυματισμός που προκαλείται από την έκθεση σε θερμική ακτινοβολία μπορεί να εκφραστεί με διάφορους τρόπους, από τους οποίους ο πλέον κατάλληλος είναι η απόδοση του τραυματισμού ως δόση D , η οποία αποτελεί συνάρτηση της θερμικής ακτινοβολίας και του χρόνου (Lees, 1996), (American Institute of Chemicals Engineers, 2000):

$$D = t_{exp} \cdot q''^{4/3}$$

$$t_{exp} = t_{react} + t_{esc}$$

όπου:

$$D = \text{Δόση θερμικής ακτινοβολίας (kJ/m}^2\text{)}$$

$$q'' = \text{Ένταση θερμικής ακτινοβολίας}$$

$$t_{exp} = \text{Χρόνος έκθεσης (s)}$$

$$t_{react} = \text{Χρόνος αντίδρασης (έναρξη διαφυγής) (s)}$$

$$t_{esc} = \text{Χρόνος διαφυγής (s)}$$

Ο μέσος χρόνος αντίδρασης (t_{react}) 120 sec υπολογίζεται ως ο μέσος όρος των παρατηρούμενων χρόνων αντίδρασης σε διάφορα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν σε πραγματικές συνθήκες και εξαρτάται από διαφόρους παράγοντες (Persson, 2002).

Ο χρόνος διαφυγής (t_{esc}) ορίζεται ως ο χρόνος που απαιτείται για να απομακρυνθεί ο εκτιθέμενος πληθυσμός από την επικίνδυνη περιοχή, σε απόσταση ασφαλείας, η οποία καθορίζεται από την ύπαρξη εξόδων διαφυγής, από το συνολικό μήκος της σήραγγας ή από το σημείο εκείνο όπου η ένταση της θερμικής ακτινοβολίας είναι μικρότερη του ορίου ασφαλείας 1 kW/m^2 (American Institute of Chemicals Engineers, 2000) (Noren & Winer, 2002).

$$t_{esc} = u / x$$

όπου:

$$t_{esc} = \text{Χρόνος διαφυγής (s)}$$

$$u = \text{Ταχύτητα διαφυγή (=0,7 m/sec [15]) (m/s)}$$

$$x = \text{Απόσταση ασφαλείας (m)}$$

Η συσχέτιση μεταξύ της έντασης της δόσης θερμικής ακτινοβολίας και του ποσοστού των θανάσιμων τραυματισμών πραγματοποιείται με τις συναρτήσεις Probit. Για την περίπτωση θανάσιμων τραυματισμών:

$$Pr = -14.9 + 2.56 \cdot \ln(D)$$

όπου:

$$Pr = \text{Αριθμός Probit}$$

$$D = \text{Δόση θερμικής ακτινοβολίας (kJ/m}^2\text{)}$$

iv. Υπερπίεση

Η συσχέτιση μεταξύ της έντασης της υπερπίεσης p_s και του ποσοστού των θανάσιμων τραυματισμών πραγματοποιείται με τις συναρτήσεις Probit. Για την περίπτωση θανάσιμων τραυματισμών:

$$Pr = -15,6 + 1,93 \cdot \ln(p_s)$$

όπου:

$$Pr = \text{Αριθμός Probit}$$

$$p_s = \text{Υπερπίεση (Pascal)}$$

v. Τοξικά αέρια

Οι επιπτώσεις από την έκθεση του ανθρωπίνου οργανισμού σε τοξικές ουσίες εξαρτώνται από την φύση και τον βαθμό τοξικότητας της ουσίας, καθώς επίσης και από την τοξική δόση. Η τοξική δόση αποτελεί μια ποσότητα συσχετισμού των θανάσιμων τραυματισμών και έκθεσης στην τοξική ουσία μέσω της συνάρτησης καταπόνησης του πληθυσμού. Συνεπώς, η τοξική δόση είναι ένας παράγοντας τραυματισμού, ο οποίος εξαρτάται από την συγκέντρωση (C) της τοξικής ουσίας στην οποία εκτίθεται ο πληθυσμός και από την διάρκεια της έκθεσης (t).

Η συσχέτιση μεταξύ της έντασης της τοξικής δόσης της αμμωνίας, του χλωρίου και της ακρολεΐνης, και του ποσοστού των θανάσιμων τραυματισμών πραγματοποιείται με τις συναρτήσεις Probit. Για την περίπτωση θανάσιμων τραυματισμών:

$$\text{Αμμωνία: } Pr = -35,9 + 1,85 \cdot \ln(C^2 * t)$$

$$\text{Χλώριο: } Pr = -8,29 + 0,92 \cdot \ln(C^2 * t)$$

$$\text{Ακρολεΐνη: } Pr = -9,93 + 2,049 \cdot \ln(C * t)$$

όπου:

$$Pr = \text{Αριθμός Probit}$$

$$C = \text{Συγκέντρωση της τοξικής ουσίας}$$

$$t = \text{χρόνος έκθεσης}$$

Στον ακόλουθο πίνακα παρουσιάζονται νομοθετικά θεσπισμένα ανώτατα όρια της μέσης χρονικά σταθμισμένης δεκαπεντάλεπτης έκθεσης [ΠΔ90/1999].

Πίνακας 9. Ανώτατα όρια μέσης χρονικά σταθμισμένης δεκαπεντάλεπτης έκθεσης

Ουσία	Ανώτατη οριακή τιμή έκθεσης	
	<i>Ppm</i>	<i>mg / m³</i>
Ακρολειΐνη	0,3	0,8
Αμμωνία	50	35
Χλώριο	1	3

Το ποσοστό των θανάσιμων τραυματισμών του εκτιθέμενου πληθυσμού (γ%) υπολογίζεται από τον παρακάτω πίνακα αντιστοίχισης με τον αριθμό Probit.

Πίνακας 10. Αντιστοίχιση του αριθμού Probit με το ποσοστό θανάτων (γ%)

%	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	-	2,67	2,95	3,12	3,25	3,36	3,45	3,52	3,59	3,66
10	3,72	3,77	3,82	3,87	3,92	3,96	4,01	4,05	4,08	4,12
20	4,16	4,19	4,23	4,26	4,29	4,33	4,36	4,39	4,42	4,45
30	4,48	4,50	4,53	4,56	4,59	4,61	4,64	4,67	4,69	4,72
40	4,75	4,77	4,80	4,82	4,85	4,87	4,90	4,92	4,95	4,97
50	5,00	5,03	5,05	5,08	5,10	5,13	5,15	5,18	5,20	5,23
60	5,25	5,28	5,31	5,33	5,36	5,39	5,41	5,44	5,47	5,50
70	5,52	5,55	5,58	5,61	5,64	5,67	5,71	5,74	5,77	5,81
80	5,84	5,88	5,92	5,95	5,99	6,04	6,08	6,13	6,18	6,23
90	6,28	6,34	6,41	6,48	6,55	6,64	6,75	6,88	7,5	7,33
-	90,0	90,1	90,2	90,3	90,4	90,5	90,6	90,7	90,8	90,9
99	7,33	7,37	7,41	7,46	7,51	7,58	7,65	7,75	7,88	8,09

vi. Επιπτώσεις καπνού

Η δόση της θερμικής ακτινοβολίας F_{heat} εκπεμπόμενης από τον καπνό υψηλών θερμοκρασιών που λαμβάνει ένα άτομο, δίνεται από τον παρακάτω τύπο και επέρχεται θάνατος στον εκτειθέμενο πληθυσμό όταν λάβει την τιμή 100% (Papazoglou & Aneziris, 1999), (Persson, 2002).

$$F_{heat} = \int_0^{t_{exp}} \frac{dt}{60 \cdot e^{(5,2-0,027 \cdot T)}}$$

όπου:

F_{heat} = Δόση της θερμικής ακτινοβολίας εκπεμπόμενης από τον καπνό (%)

t_{exp} = Χρόνος έκθεσης (s)

T_a = Θερμοκρασία του καπνού (°C)

Τέλος, η τοξική δόση $F_{toxicity}$ από έκθεση σε μονοξειδίου του άνθρακα (CO) που λαμβάνει ένα άτομο δίνεται από τον παρακάτω τύπο και επέρχεται θάνατος στον εκτιθέμενο πληθυσμό όταν λάβει την τιμή 100% (Palsson, 2004) (Beard & Carvel, 2005).

$$F_{toxicity} = \int_0^{t_{exp}} \frac{C}{90} dt$$

όπου:

$F_{toxicity}$ = Τοξική δόση από έκθεση σε μονοξειδίου του άνθρακα (CO) (%)

t_{exp} = Χρόνος έκθεσης (s)

C = Συγκέντρωση μονοξειδίου του άνθρακα (CO) (%)

[...]»

4.5.4 Εκτίμηση επικινδυνότητας μέσω υπολογισμού της αναμενόμενης επιπτώσης ατυχήματος.

1. Η προτεινόμενη από την Ε. Ναθαναήλ(2010) υπολογιστική πλατφόρμα, διαμορφώνει τρία κριτήρια προκειμένου να αξιολογηθούν οι εναλλακτικές διαδρομές: Το 1^ο κριτήριο «Επιπτώσεις στον πληθυσμό», 2^ο κριτήριο «Επιπτώσεις στην περιουσία» και το 3^ο κριτήριο «Επιπτώσεις στο περιβάλλον». Από τα κριτήρια αυτά, ο χρήστης, επιλέγει εκείνα που θα χρησιμοποιηθούν για την αξιολόγηση της καταλληλότερης διαδρομής. Στην συνέχεια, οι εναλλακτικές διαδρομές, που έχουν ήδη προσδιοριστεί από τον χρήστη και για τις οποίες έχουν υπολογιστεί οι δείκτες αξιολόγησης, αξιολογούνται συγκριτικά για κάθε κριτήριο από τον χρήστη, με βάση τα δεδομένα των αποτελεσμάτων της μεθοδολογίας. Η τελική επιλογή της καταλληλότερης διαδρομής για την μετακίνηση των οχημάτων που μεταφέρουν επικίνδυνα φορτία, γίνεται στη συνέχεια, όπου εμφανίζονται οι τελικοί δείκτες αξιολόγησης για όλες τις επιλεγμένες εναλλακτικές διαδρομές και

υποδεικνύεται η διαδρομή με τον μικρότερο δείκτη και συνεπώς η καταλληλότερη για την μεταφορά του ΕΦ.

2. Οι (Nathanail, et al., 2010) υπολογίζουν τον συντελεστή κοινωνικής διακινδύνευσης SR ως εξής:

(i) Καταρχήν υπολογίζεται ο συνολικός αριθμός των θανάσιμων τραυματισμών (N) , από την παρακάτω σχέση:

$$N = D_{pop} * [0,95 * A_{90} + 0,70 (A_{50} - A_{90}) + 0,30 * (A_{10} - A_{50})] \quad (2)$$

όπου:

N = Συνολικός αριθμός θανάσιμων τραυματισμών

D_{pop} = Πληθυσμιακή πυκνότητα (άτομα/ m²)

A_y = Επιφάνεια όπου η δόση που λαμβάνει ο εκτιθέμενος πληθυσμός έχει ως συνέπεια ποσοστό γ% θανάσιμων τραυματισμών (m²)

Η μέθοδος που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της επίδρασης ενός κινδύνου περιγράφεται ως εξής: Αρχικά καθορίζονται οι αποστάσεις «x» στις οποίες το φαινόμενο προκαλεί θανάτους σε ποσοστό γ (90%, 50% και 10%). Οι επιφάνειες αυτών των περιοχών υποδηλώνονται ως A_{90} , A_{50} and A_{10} . Ο μέσος όρος των θανάτων σε κάθε μια από αυτές τις περιοχές λαμβάνεται ως ο μέσος όρος των θανάτων στα σύνορα της περιοχής. Επομένως ο συντελεστής για την περιοχή με επιφάνεια A_{90} είναι 0,95 (= (1,0-0,90)/2), για τον δακτύλιο (A_{50} - A_{90}) είναι 0,7 και για τον δακτύλιο (A_{10} - A_{50}) είναι 0,3.

Η πληθυσμιακή πυκνότητα (D_{pop}) της ουράς των σχηματιζόμενων οχημάτων μέσα στην κάθε σήραγγα, λαμβάνεται ίση με 0,056 άτομα/m² για αυτοκινητοδρόμους και 0,05 άτομα/m² για το υπόλοιπο οδικό δίκτυο (Lees, 1996).

(ii) Στη συνέχεια υπολογίζεται η αθροιστική συχνότητα F για N ή περισσότερους θανάτους αφού έχουν υπολογιστεί (a) οι συχνότητες εμφάνισης των 11 τελικών σεναρίων (f_i) (ενότητα 4.5.2) (b) οι αντίστοιχες δόσεις των βλαπτικών επιπτώσεων στον ανθρώπινο οργανισμό δηλ. η θερμική ακτινοβολία, η υπερπίεση, η τοξική δόση, η θερμοκρασία καπνού, τα αέρια καύσης (ενότητα 4.5.3.3, 2) (c) με βάση τις παραπάνω υπολογισθείσες, αναλόγως του σεναρίου, δόσεις, προέκυψε το ποσοστό του πληθυσμού που θα τραυματιστεί θανάσιμα.

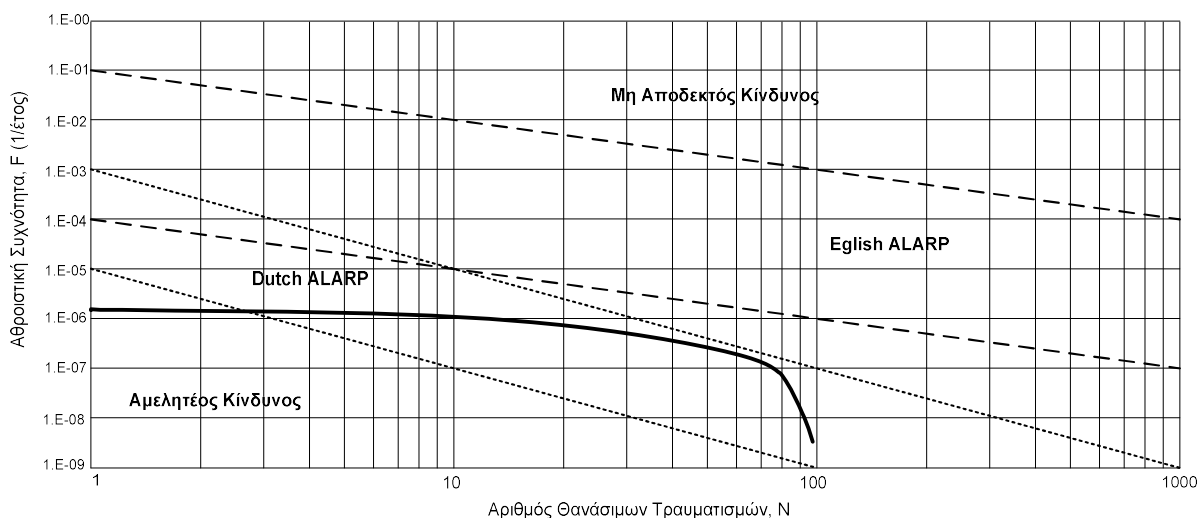
(iii) Το διάγραμμα της αθροιστικής συχνότητας F για N ή περισσότερους θανάτους σε λογαριθμική κλίμακα, σχηματίζει την καμπύλη F/N και αποτελεί τον

δείκτη της κοινωνικής διακινδύνευσης SR (Societal Risk) (American Institute of Chemical Engineers, 1995) (American Institute of Chemicals Engineers, 2000).

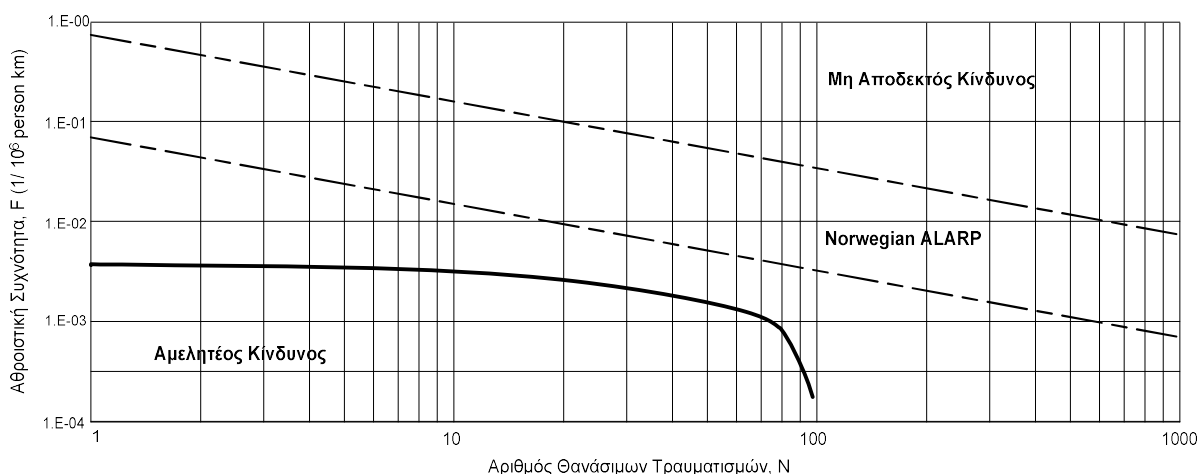
Τα κράτη μέλη που έχουν θεσπίσει όρια για την κοινωνική διακινδύνευση (Societal Risk, F/N curves) είναι το Ηνωμένο Βασίλειο (HB), η Ολλανδία και η Νορβηγία. Τα όρια αυτά παρουσιάζονται στο διάγραμμα 4.1 για το HB και την Ολλανδία και στο διάγραμμα 4.2 για την Νορβηγία. Πρέπει να σημειωθεί ότι η αθροιστική συχνότητα εμφάνισης συμβάντος με N ή περισσότερους θανάσιμους τραυματισμούς εκφράζεται σε γεγονότα ανά έτος για το HB και την Ολλανδία, ενώ εκφράζεται σε γεγονότα ανά 10^6 ανθρωποχιλιόμετρα για την Νορβηγία.

Τα διαγράμματα χωρίζονται σε τρεις περιοχές. Την περιοχή «Μη Αποδεκτού Κινδύνου», όπου στην περίπτωση που κάποιο τμήμα της καμπύλης F/N βρίσκεται σε αυτή, η συγκεκριμένη δραστηριότητα διέλευσης οχημάτων μεταφοράς ΕΦ εγκυμονεί μη αποδεκτούς κινδύνους από πλευράς συχνότητας εμφάνισής τους. Την περιοχή «Αμελητέου Κινδύνου», όπου στην περίπτωση που ολόκληρη η καμπύλη F/N βρίσκεται μέσα σε αυτήν, η συγκεκριμένη δραστηριότητα χαρακτηρίζεται ως αποδεκτή από πλευράς συχνότητας εμφάνισης κινδύνων οδικών ατυχημάτων με την εμπλοκή του επικίνδυνου εμπορεύματος. Την περιοχή «ALARP» (As Low as reasonably Practicable) όπου στην περίπτωση που κάποιο τμήμα της καμπύλης F/N βρίσκεται σε αυτή, η συγκεκριμένη δραστηριότητα διέλευσης οχημάτων μεταφοράς ΕΦ, εγκυμονεί κινδύνους για τους οποίους θα πρέπει να ληφθούν αποτελεσματικά μέτρα, όπου αυτό είναι πρακτικά δυνατό, για την μείωση της συχνότητας εμφάνισής τους στην περιοχή «Αμελητέου Κινδύνου».

Διάγραμμα 1: Αθροιστική συχνότητα F για N ή περισσότερους θανάτους σύμφωνα με την Αγγλική και Ολλανδική Νομοθεσία.(πηγή (Nathanail, et al., 2010)



Διάγραμμα 2: Αθροιστική συχνότητα F για N ή περισσότερους θανάτους σύμφωνα με την Νορβηγική Νομοθεσία(πηγή (Nathanail, et al., 2010))



3. Οι (Kazantzi, et al., 2011), (Androutsopoulos & Zografos, 2010), (Poku-Boansi, et al., 2018) και άλλοι ερευνητές υπολογίζουν την επικινδυνότητα της οδικής μεταφοράς ΕΦ με τη χρήση του μεγέθους παραδοσιακό ρίσκο (traditional risk) το οποίο δίνεται από την εξίσωση των (Erkut & Verter, 1998):

$$R = \sum P_i \times C_i,$$

όπου P_i , η πιθανότητα ατυχήματος με εμπλοκή οχήματος HAZMAT στο τμήμα i και υπολογίζεται σύμφωνα με την εξίσωση (1) της ενότητας 4.5.2 και

$$C_i = P_{d_i} \times p \times r^2$$

όπου C_i η επίπτωση του ατυχήματος σε όρους εκτεθειμένου πληθυσμού, P_{d_i} η πυκνότητα πληθυσμού στην γειτονιά του ατυχήματος και r η ακτίνα περιοχής επίδρασης. Σε ότι αφορά στον υπολογισμό της επίπτωσης του ατυχήματος, οι αναφερόμενοι ερευνητές εξετάζουν την περίπτωση εύφλεκτων υγρών καυσίμων, ενώ για τον υπολογισμό της περιοχής επίδρασης της περιοχής λαμβάνεται καθορισμένη τιμή ακτίνας r .

4.5.5 Συμπεράσματα σχετικά με την κεντρική μεθοδολογία εκτίμησης οδικής μεταφορικής επικινδυνότητας ΕΦ.

Η κεντρική μεθοδολογία εκτίμησης επικινδυνότητας μεταφοράς ΕΦ μέσω οδικού δικτύου, όπως προτάθηκε από τους (Nathanail, et al., 2010), (Nathanail, 2008) αποτελεί μια ολοκληρωμένη μελετητική πρόταση ικανή να χρησιμοποιηθεί για κάθε περίπτωση οδικού δικτύου (ανοικτούς ή κλειστούς αυτοκινητοδρόμους, οδικές σήραγγες) καθώς και εν δυνάμει εργαλείο στα χέρια αρμοδίων λήψεων αποφάσεων που επιθυμούν την μείωση της επικινδυνότητας μέσω αξιολόγησης εναλλακτικών διαδρομών.

Η μεθοδολογία αυτή επίσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί για κάθε περίπτωση επικίνδυνου φορτίου, δεδομένου ότι περιλαμβάνει τον υπολογισμό της ζώνης επίδρασης για κάθε σενάριο ατυχήματος και φαινόμενο εξέλιξης του. Σε ότι αφορά τον υπολογισμό των πιθανοτήτων ατυχήματος και διαρροής δεδομένου της μη ύπαρξης σχετικών ιστορικών δεδομένων ατυχημάτων γίνονται οι σχετικές παραδοχές του PIARC, καθώς και η χρήση δέντρου σφάλματος (όπως περιγράφονται στην ενότητα 4.5.2) συνεπάγοντας αποτελέσματα ανεξάρτητα των αιτιών ατυχημάτων των χαρακτηριστικών του δικτύου ή του τύπου οχήματος, των συνθηκών. Σημειώνεται ότι στην περίπτωση που ιστορικά δεδομένα ατυχημάτων είναι διαθέσιμα, το μοντέλο διαθέτει την επιλογή ενσωμάτωσής τους.

Τέλος χρησιμοποιεί το μέγεθος κοινωνικής διακινδύνευσης για τον προσδιορισμό του δείκτη επικινδυνότητας με αποτέλεσμα να είναι δυνατή η αξιολόγηση του αποτελέσματος και η αποδοχή του ή όχι, σε σχέση με τις θεσμοθετημένες καμπύλες FN του Αγγλικού, Ολλανδικού και Νορβηγικού συστήματος.

4.6. Πολυτροπική μεταφορά επικίνδυνων φορτίων

Ως πολυτροπική μεταφορά εννοείται ο συνδυασμός τουλάχιστον δύο μεταφορικών μέσων μεταξύ ενός ζεύγους εκκίνησης και προορισμού. Στην περίπτωση της μεταφοράς επικίνδυνων φορτίων, εννοείται ο συνδυασμός τουλάχιστον δύο δικτύων μέσω κατάλληλων οχημάτων μεταφοράς τους. Όπως εισαγωγικά αναφέρθηκε, στην παρούσα εργασία επιλέγεται να μελετηθεί ο συνδυασμός οδικού και σιδηροδρομικού δικτύου, δεδομένης της ραγδαίας ανάπτυξης που απολαμβάνει στον τομέα μεταφοράς των εμπορευματικών και κατά επέκταση των επικίνδυνων φορτίων.

Η ραγδαία αυτή χρήση συνδυασμένων μέσων (οχημάτων και τραίνων) έχει ως κύριο πλεονέκτημα την αξιοποίηση των θετικών στοιχείων και των δύο μέσων που οδηγεί σε χρονικά και οικονομικά αποτελεσματικότερες λύσεις μεταφοράς

φορτίων. (US, DOT,2010) . Ειδικά στην βόρεια Αμερική και τις ΗΠΑ, η πολυτροπική σιδηροδρομική μεταφορά (rail intermodal) δηλαδή η μεταφορά, εμπορευματικών κοντέινερς και ρυμουλκούμενων φορτηγών πάνω σε επίπεδη αμαξοστοιχία αυξήθηκε κατά 245% από 5,6 εκατομμύρια φορτία το 1990 σε 13,7 εκατομμύρια το 2017. (AAR, 2018)

4.6.1 Διαφορές μεταξύ οδικής/σιδηροδρομικής μεταφοράς ΕΦ και διατροπικής μεταφοράς ΕΦ.

Στην παρούσα ενότητα παρουσιάζονται οι διαφορές που εντοπίστηκαν μεταξύ της αμιγούς σιδηροδρομικής ή οδικής και της συνδυασμένης μεταφοράς επικίνδυνων φορτίων. Τα σημεία αυτά επί της ουσίας, αποτελούν και τα ερεθίσματα των ερευνών που ενσωματώθηκαν στο παρούσα ενότητα. Συγκεκριμένα:

- Η πολυτροπική μεταφορά επικίνδυνων φορτίων απαιτεί την μεταφορά των HAZMAT κοντέινερς ή ρυμουλκούμενων ή βυτίων από το ένα μέσο στο άλλο. Η διαδικασία αυτή απαιτεί ειδικό χώρο με ειδικό εξοπλισμό και εκπαιδευμένους χειριστές.
- Οι εξοπλισμένοι αυτοί σταθμοί αλλαγής και μεταφόρτωσης αυξάνουν το κόστος των μεταφορέων και την επικινδυνότητα της μεταφοράς.
- Επίσης στους σταθμούς αλλαγής και μεταφόρτωσης παρατηρείται συμφόρηση και χρόνος αναμονής καθώς οι εμπορευματικοί αυτοί σταθμοί εξυπηρετούν το σύνολο των εμπορευμάτων, επικίνδυνων και μη. Η συμφόρηση αυξάνει τον συνολικό κίνδυνο μεταφοράς.
- Γενικότερα κατά τον σχεδιασμό ενός πολυτροπικού δικτύου είναι κρίσιμη η επιλογή των ενδιάμεσων κόμβων (hub location problem) και σταθμών μεταφόρτωσης. Παράμετροι όπως το κόστος, η ζήτηση και ο χρόνος μεταφοράς μπορούν εύκολα να μεταβληθούν, εξαιτίας απρόβλεπτων παραγόντων και αβεβαιοτήτων του λειτουργικού συστήματος. Αυτές οι αβεβαιότητες επηρεάζουν την απόδοση του σχεδιασμένου μεταφορικού δικτύου. Λόγου χάρη, οι αλλαγές στον χρόνο μεταφοράς οδηγούν σε καθυστερήσεις οι οποίες με την σειρά τους οδηγούν στην αύξηση του κόστους.

4.6.2 Σύντομη βιβλιογραφική ανασκόπηση προτάσεων εκτίμησης επικινδυνότητας σε διατροπικό μεταφορικό σύστημα.

Στην υποενότητα αυτή αναφέρονται συνοπτικά οι πρώτες ερευνητικές προτάσεις σχετικά με την εκτίμηση της επικινδυνότητας σε συνδυασμένο οδικό και σιδηροδρομικό δίκτυο.

1. Πολλές αρχικές έρευνες εστίασαν στην σύγκριση μεταφοράς επικίνδυνων φορτίων με την χρήση οδικού και σιδηροδρομικού δικτύου. Οι (Bubbico, et al., 2006) έκανε χρήση τριών κλάσεων ΕΦ για να αποδείξουν ότι ο περιορισμός της συνολικής επικινδυνότητας είναι δυνατή όχι μόνο αλλάζοντας την διαδρομή αλλά χρησιμοποιώντας και διαφορετικό μέσο. Μελετήθηκαν 55 περιπτώσεις στην Σικελία Ιταλίας και τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η μετακίνηση των φορτίων από το οδικό στο σιδηροδρομικό ή συνδυασμένο σύστημα μείωνε αξιοσημείωτα την επικινδυνότητα.
2. Οι (Verma & Verter, 2008) μελέτησαν την ισορροπία (trade-off) της διατροφικής μεταφοράς ΕΦ μεταξύ οδικής και σιδηροδρομικής μεταφοράς.
3. Επίσης ο σχεδιασμός της διατροφικής μεταφοράς επικίνδυνων φορτίων με χρήση μεικτού οδικού και σιδηροδρομικού δικτύου με κριτήριο την συνολική επικινδυνότητα HAZMAT, αποτέλεσε πεδίο έρευνας. Μία από τις αρχικές προτάσεις αποτελεί η δημοσίευση της (Mazzarotta, 2002) η οποία παρουσίασε μία ποσοτική προσέγγιση ανάλυσης επικινδυνότητας για τη μεταφορά HAZMAT, όπου η επικινδυνότητα κυρίως εξαρτώνταν από τα χαρακτηριστικά της επικίνδυνης ουσίας.
4. Επίσης αναφέρονται η πρόταση των (M.Verma & Verter, 2010) με στόχο την παρουσίαση του γενικού πλαισίου σχεδιασμού διατροφικού δικτύου όπου οι αποστολείς και παραλήπτες είχαν πρόσβαση σε ένα σταθμό μεταφόρτωσης. Η πρόταση αυτή στη συνέχεια αναπτύχθηκε για πολλαπλά ζεύγη Εκκίνησης-Προορισμού (Verma, et al., 2012) και επεκτάθηκε περαιτέρω με την ενσωμάτωση ρήτρας στην περίπτωση καθυστερημένων παραδόσεων (Verma, 2012)
5. Οι (Xie, et al., 2012) μελέτησαν το πρόβλημα του σχεδιασμού της μεταφοράς διατροφικών δικτύων (δηλαδή την επιλογή της θέσης των σταθμών μεταφόρτωσης και των δρομολογίων) λαμβάνοντας υπόψη το συνολικό κόστος και επικινδυνότητα κάθε επιλογής (διαδρομής και σταθμών).

4.6.3 Πρόσφατες έρευνες εκτίμησης επικινδυνότητας σε διατροφικό μεταφορικό σύστημα.

1. Οι (Assadipour, et al., 2015) σχετικά με την επίπτωση της συμφόρησης στους εμπορευματικούς σταθμούς και του επαρκούς (ή μη) ειδικού εξοπλισμού-γερανών που διαθέτουν στο συνολικό κόστος και συνολική επικινδυνότητα των

εναλλακτικών δρομολογίων, αναπτύσσουν μία μη γραμμική μαθηματική διατύπωση του προβλήματος το οποίο επιλύουν ως ένα δι-κριτηριακό μη γραμμικό μοντέλο βελτιστοποίησης όπου ζητούμενα είναι η ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους και της συνολικής επικινδυνότητας. Η συμφόρηση των σταθμών μοντελοποιείται με την χρήση των Μαρκοβιανών ουρών αναμονής (Markovian queues). Ο υπολογισμός της HAZMAT συνολικής επικινδυνότητας, επιτυγχάνεται σε όρους εκτεθειμένου πληθυσμού (exposure population). Συγκεκριμένα υπολογίζεται ως το άθροισμα των επιμέρους γινομένων (i) του εκτεθειμένου πληθυσμού από τη μεταφορά ενός φορτίου(κοντέινερ) σε κάθε διαδρομή, επί τον αριθμό φορτίων που το χρησιμοποιούν (ii) του εκτεθειμένου πληθυσμού από την παραμονή στην ουρά αναμονής ενός κοντέινερ σε κάθε σταθμό μεταφόρτωσης επί τον αριθμό των κοντέινερ που βρίσκονται σε κάθε σταθμό. Ο εκτεθειμένος πληθυσμός ανά διαδρομή προσδιορίζεται ως ο πληθυσμός που κατοικεί εντός της ζώνης επίδρασης ενός ατυχήματος διαρροής αερίου(ή υγροποιημένου αερίου) που μετατρέπεται σε αεροσωματίδια και ταξιδεύουν σε μακρινές αποστάσεις προκαλώντας τοξική έκθεση. Η ακτίνα της περιοχής επιρροής υπολογίζεται με το Γκαουσσσιανό μοντέλο διασποράς (Gaussian plume model) και όριο τοξικής συγκέντρωσης το επίπεδο συγκέντρωσης του έκτακτου κινδύνου για τη ζωή και την υγεία των ΗΠΑ - Immediately Dangerous to Life and Health- IDLH(βλέπε ενότητα 3.4) και επιλυθεί, υπό τις δυσμενέστερες καιρικές συνθήκες (Verma and Verter, 2007). Σε ότι αφορά την περιοχή επιρροής από πιθανό ατύχημα στους εμπορευματικούς σταθμούς μεταφόρτωσης, προσδιορίζεται ίση με μια ζώνη ακτίνας 800μ γύρω από μια προκληθείσα φωτιά φορτίου χλωρίου, όπως οι μελετητές επικαλούνται ότι έχει ήδη προταθεί και εφαρμοστεί από μια σειρά ερευνητών (Batta & Chiu, 1988), (Revelle, et al., 1991). Από την άλλη η επικινδυνότητα λόγω συμφόρησης στους σταθμούς υπολογίζεται προσεγγιστικά μέσω μια κυκλικής περιοχής επίδρασης με κέντρο το σταθμό κατά τους (Erkut & Verter, 1998)

Η επίλυση του πολυκριτηριακού μοντέλου βασίζεται στη, όπου εφαρμόζονται συντελεστές βαρύτητας στο συνολικό κόστος και συνολική επικινδυνότητα του μεταφορικού συστήματος. Το σενάριο όπου οι συντελεστές βαρύτητες είναι ίσοι, είναι το βασικό σενάριο. Για την επίλυση της περίπτωσης μελέτης επιλέγεται το intermodal δίκτυο του Norfolk των ΗΠΑ που μεταφέρει επικίνδυνα και μη φορτία, αποτελούμενο από 20 εμπ. σταθμούς μεταφόρτωσης, 62 intermodal αμαξοστοιχίες (επίπεδες αμαξοστοιχίες που μεταφέρουν κοντέινερς και βυτία, δεξαμενές φορτηγών) που εκτελούν διαφορετικές διαδρομές μεταξύ των κόμβων και σε διαφορετικές ταχύτητες (31 συμβατά τραίνα και 31 ταχεία τραίνα). Επίσης εισάγονται δεδομένα ζήτησης μεταφοράς επικίνδυνων και μη φορτίων, κόστος ανά σιδηροδρομικό και οδικό χιλιόμετρο μεταφοράς, κόστος ρυμούλκησης

φορτίων και ικανότητα γερανών ανά ημέρα, χρόνος παράδοσης φορτίων, πληθυσμιακά δεδομένα κ.α

Το αποτέλεσμα κάθε λύσης είναι ένα ζεύγος τιμών που καθορίζεται από τους συντελεστές βαρύτητας κάθε μεταβλητής (π.χ. 10% συντελεστής βαρύτητας Κόστους & 90% συντελεστής βαρύτητας Επικινδυνότητας). Το κάθε ζεύγος αντιστοιχεί σε τιμές για συνολικό κόστος, για επικινδυνότητα στους σταθμούς λόγω ρυμούλκησης & συμφόρησης και στο πεδίο/πορεία, για τον αριθμό των απαιτούμενων γερανών ανά σταθμό μεταφόρτωσης, τα απαιτούμενα τραίνα και τον τύπο τους (κανονικά ,ταχεία) και τον χρόνο αναμονής στην ουρά. Ως βασικό σενάριο θεωρείται αυτό με συντελεστές βαρύτητας των μεταβλητών επικινδυνότητα και κόστος 50% και 50%.

Ενδεικτικά τα πιο αξιολογα συμπεράσματα που προκύπτουν από την μελέτη είναι: (i) η λύση της ελάχιστης επικινδυνότητας είναι σημαντικά πιο ακριβή διότι προϋποθέτει τη χρήση όλων των διαθέσιμων γερανών και των γρήγορων τραίνων (123% πιο ακριβή από το βασικό σενάριο) (ii) Το μεγαλύτερο ποσοστό επικινδυνότητας (και κόστους) προέρχεται από την μεταφορά των ΕΦ στο πεδίο. Όμως και η επικινδυνότητα ρυμούλκησης και συμφόρησης δεν είναι αμελητέες τιμές και πρέπει να λαμβάνονται υπόψη (iii) η λύση του ελάχιστου κόστους είναι 1,5% οικονομικότερη από το βασικό σενάριο, αλλά 34% πιο επικίνδυνη. Στο σενάριο αυτό η αύξηση της επικινδυνότητας καταρχήν προέρχεται από την επιλογή συντομότερων και επικινδυνότερων διαδρομών (οδικών και σιδηροδρομικών), ενώ το ρίσκο συμφόρησης είναι ελαφρώς μειωμένο κατά 3%. (iv) Το σενάριο της ελάχιστης επικινδυνότητας αντιστοιχεί σε κόστος \$122,8εκατ. και έκθεση 8.8 εκατ. ατόμων σε κίνδυνο, ενώ το σενάριο του ελάχιστου κόστους αντιστοιχεί σε \$54.1 εκατ. και 15.5 εκατ. πληθυσμό σε κίνδυνο.

2. Σε συνέχεια της προηγούμενης μελέτης οι ίδιοι ερευνητές (Assadipour, et al., 2016) διερευνούν την εφαρμογή διοδίων ως μέσο διαχείρισης και μείωσης της επικινδυνότητας κατά την διατροπική μεταφορά επικίνδυνων φορτίων (χρήση οδικού και σιδηροδρομικού δικτύου). Εφαρμόζοντας ένα δι-επιπεδιακό, δι-παραγοντικό μοντέλο προτείνουν λύση στο πρόβλημα του σχεδιασμού της μεταφοράς HAZMAT όταν ζητούμενο του μεταφορέα είναι η επιλογή του οικονομικότερου σχεδιασμού εντός των επιθυμητών χρόνων παράδοσης, ενώ στόχος των Αρχών αποτελεί η βέλτιστη διαχείριση (μείωση) της επικινδυνότητας HAZMAT μέσω της εφαρμογής διοδίων αλλά και η διατήρηση του κόστους διοδίων στη χαμηλότερη δυνατή τιμή προκειμένου το δίκτυο να παραμένει ελκυστικό. Σε ότι αφορά τις παραδοχές και την μεθοδολογία υπολογισμού της επικινδυνότητας ακολουθείται η προαναφερόμενη (Assadipour, et al., 2015). Τα αποτελέσματα της επίλυσης Pareto frontier αποτελούν διαφορετικά ζεύγη, κόστους διοδίων και επικινδυνότητας σε όρους εκτεθειμένου πληθυσμού. Τα δυο ακραία σενάρια είναι

το A(μικρότερος αριθμός εκτεθειμένου πληθυσμού-μεγαλύτερο κόστος διοδίων) και το Q (μεγαλύτερος αριθμός εκτεθειμένου πληθυσμού-μηδενικό κόστος). Για κάθε ζεύγος λύσης, το μοντέλο υπολογίζει το επικίνδυνο φορτίο, την επικινδυνότητα και το κόστος διοδίων ανά διαδρομή, τους χρόνους που το φορτίο διανύει στο σιδηροδρομικό δίκτυο και στο οδικό δίκτυο, και υποδεικνύει τους σταθμούς που πρέπει να μπουν διόδια καθώς και την τιμή των διοδίων, προκειμένου να επιτυγχάνεται η ζητούμενη ισορροπία(trade off) μεταξύ συνολικού κόστους διοδίων και επικινδυνότητας όλου του δικτύου. Στην περίπτωση μελέτης που παρουσιάζεται στη δημοσίευση και αφορά στο intermodal δίκτυο του Norfolk στις ΗΠΑ(το προαναφερόμενο των (Assadipour, et al., 2015), ενδεικτικά αποτελέσματα έδειξαν ότι ένα λιγότερο εκτεθειμένο άτομο αντιστοιχεί σε αύξηση του κόστους διοδίων ίση με \$0,009. Επίσης αξιόλογο συμπέρασμα είναι ότι για όλες τις λύσεις Pareto ο σιδηροδρομικός χρόνος κίνησης είναι σχεδόν σταθερά διπλάσιος του οδικού χρόνου. Τέλος το μοντέλο για το A ζεύγος κόστους-επικινδυνότητας, προτείνει μεγαλύτερο κόστος διοδίων στις πολυπληθέστερες πόλεις (δηλ. Νέα Υόρκη, Charlotte, Ινδιανάπολη) εξαιρώντας την Φιλαδέλφεια η οποία σύμφωνα με τους υπολογισμούς έχει επικινδυνότερο εμπορευματικό σταθμό. Επίσης εξετάστηκε η επίδραση του χρόνου παράδοσης στη συνολική επικινδυνότητα του δικτύου, με αποτέλεσμα η αύξηση του χρόνου παράδοσης ως δεδομένο, έδωσε λύση με μικρότερη συνολική επικινδυνότητα επειδή το μοντέλο επέλεξε μεγαλύτερες και ασφαλέστερες διαδρομές, ενώ η μείωση του χρόνου παράδοσης έδωσε λύση με ταχεία τραίνα που διέρχονται από περιοχές με πυκνότερο πληθυσμό και πιο «επικίνδυνα» οδικά τμήματα. Τέλος σημειώνεται ότι στην πρόταση αυτή γίνεται μια σειρά από παραδοχές προκειμένου να απλοποιηθεί το υπολογιστικό μοντέλο, με σημαντικότερη ότι δεν λαμβάνεται υπόψη η επικινδυνότητα που προέρχεται από τη λειτουργία μεταφόρτωσης εντός των σταθμών.

3. Η επιλογή του σταθμού που θα λειτουργήσει ως σταθμός αλλαγής μέσων και μεταφόρτωσης και ο τελικός σχεδιασμός των δρομολογίων με στόχο τον βέλτιστο συνδυασμό κόστους και επικινδυνότητας αποτελεί πεδίο έρευνας. Οι (Jiang, et al., 2014) πρότειναν ένα μοντέλο πολυτροπικής μεταφοράς HAZMAT το οποίο βελτιστοποιεί την επιλογή των σταθμών αλλαγής και μεταφόρτωσης και τον σχεδιασμό της τελικής διαδρομής ανάμεσα σε ζεύγη εκκίνησης και προορισμού. Το μοντέλο τους σχεδιάζεται ως ένα 0-1 γραμμικό πρόγραμμα ακεραίων, το οποίο αναζητά την βέλτιστη λύση (διαδρομή και επιλογή σταθμών) προκειμένου να επιτευχθεί το μικρότερο κόστος και ρίσκο. Στην μοντελοποίηση του κόστους και της επικινδυνότητας εφαρμόστηκαν συντελεστές βαρύτητας για την εύρεση της trade-off λύσης.

Οι ερευνητές εξέτασαν την περίπτωση ενός μεικτού δικτύου στην Βόρεια Κίνα αποτελούμενο από 6 υποψήφιους σταθμούς αλλαγής και μεταφόρτωσης, 6 οδικούς κόμβους και 1 σιδηροδρομικό και συνολικά 12 ζεύγη εκκίνησης και προορισμών. Το μοντέλο στον υπολογισμό του λαμβάνει υπόψη: (i) για κάθε σταθμό μεταφόρτωσης, επικινδυνότητα r ανά φορτίο λόγω πιθανής διαρροής του από τις ενέργειες μεταφόρτωσης και κόστος σταθμού εξαιτίας του ετήσιου κόστους κεφαλαίου του σταθμού και του λειτουργικού του κόστους. Το κόστος κεφαλαίου του σταθμού είναι ανεξάρτητο από την ποσότητα φορτίων HAZMAT που μεταφέρονται. Κάθε σταθμός έχει μια δεδομένη ετήσια ικανότητα (σε φορτία ανά έτος) (ii) Επίσης κάθε απόσταση (διαδρομή) του μοντέλου έχει μια επικινδυνότητα και κόστος ανά μεταφερόμενο φορτίο. Κάθε διαδρομή έχει μια δεδομένη ικανότητα (σε φορτία) (iii) Η επικινδυνότητα και το κόστος είναι ανεξάρτητα χρόνου. (iv) Στην υπόθεση, ένα είδος επικίνδυνου φορτίου μεταφέρεται (v) θέτονται υποθετικές τιμές κόστους ανά χιλιόμετρο και φορτίο για το οδικό και σιδηροδρομικό δίκτυο και υποθετική επικινδυνότητα (εκτεθειμένα άτομα ανά μεταφερόμενο φορτίο).

Στα αποτελέσματα διαπιστώθηκε ότι: (i) στο σενάριο του ελάχιστου κόστους το κόστος είναι 4343 εκατ. και εκθέτει 3,2 εκατ. άτομα ενώ το σενάριο ελάχιστης επικινδυνότητας κοστίζει 4709 εκατ. και εκθέτει 1,6 εκατ. άτομα (ii) με αύξηση του συνολικού κόστους κατά 1,9% η συνολική επικινδυνότητα μειωνόταν κατά 66%.

4. Τέλος οι (Mohammadi, et al., 2017) μελετούν τον σχεδιασμό ενός αξιόπιστου πολύ-τροπικού πολύ-εμπορευματικού μοντέλου για την μεταφορά επικίνδυνων φορτίων κάτω από αβεβαιότητες. Προτείνουν ένα πιθανολογικό-στοχαστικό μαθηματικό μοντέλο το οποίο λαμβάνει υπόψη του αβεβαιότητες στον χρόνο μεταφοράς, τις πιθανότητες ατυχήματος HAZMAT, συντελεστή χωρητικότητας δικτύου και χωρητικότητα σταθμών μεταφόρτωσης με χρόνο σε ουρές αναμονής. Στην επίλυση του προτεινόμενου μη γραμμικού μοντέλου προγραμματισμού μεικτών ακεραίων, ενσωματώνεται η μεθοδολογία προγραμματισμού τυχαίων περιορισμών (chance – constrained programming), η οποία προσφέρει μεγάλο δείκτη εμπιστοσύνης της λύσης και αντιμετωπίζει τις αβεβαιότητες του μοντέλου.

Σε ότι αφορά στην μοντελοποίηση της επικινδυνότητας HAZMAT, οι ερευνητές εκφράζουν την επικινδυνότητα εντός της διαδρομής (η οποία αποτελείται από τα επιμέρους τμήματα) ως συνάρτηση της απόστασης του κάθε τμήματος διαδρομής από την πηγή του ατυχήματος, τον εκτιθέμενο πληθυσμό, τον αριθμό των HAZMAT φορτίων που κινούνται στο τμήμα της διαδρομής και τα χαρακτηριστικά του δικτύου που αντιστοιχούν στην πιθανότητα ατυχήματος. Η επικινδυνότητα μετράται σε μονάδες ροών HAZMAT επί τον αριθμό εκτιθέμενων ατόμων. Η

επικινδυνότητα στις διαδρομές κόμβων –σε- σταθμούς μεταφόρτωσης, σταθμούς μεταφόρτωσης –σε- σταθμούς μεταφόρτωσης λαμβάνουν ξεχωριστή συνάρτηση (όμοιου χαρακτήρα) ενώ στην εξίσωση της επικινδυνότητας εντός σταθμών μεταφόρτωσης αγνοείται η απόσταση από την πηγή ατυχήματος και ενσωματώνεται ο χρόνος αναμονής ουρών.

Στην περίπτωση μελέτης που παρουσιάζουν, λαμβάνεται υπόψη υπαρκτό δίκτυο του Ιράν που ενώνει διυλιστήρια, χημική και πετροχημική βιομηχανία, ανακυκλώσιμα κέντρα, εργοστάσια παραγωγής και κατανομής ηλεκτρισμού καθώς και τις πόλεις. Επίσης μελετάται η μεταφορά υγρών καυσίμων και διαβρωτικών ουσιών. Οι πιθανότητες ατυχήματος σε κάθε τμήμα διαδρομής υπολογίζονται από τα ιστορικά πραγματικά δεδομένα.

Τελικά εφαρμόζεται το μοντέλο Pareto frontier για τον προσδιορισμό της ισορροπίας trade-off μεταξύ επικινδυνότητας και κόστους στη μεταφορά HAZMAT. Ενδεικτικά αποτελέσματα της μελέτης είναι ότι η εφαρμογή του προτεινόμενου μοντέλου μειώνει την επικινδυνότητα κατά 19,51% στους κόμβους αλλαγής 21,40% κατά μήκος της διαδρομής, και κατά 21,40% στο σύνολο του δρομολογίου. Επίσης η αύξηση του συνολικού κόστους κατά 15% η επικινδυνότητα του δικτύου μεταφοράς HAZMAT μειώνεται κατά 53%.

4.6.4 Συμπεράσματα για τι μεθοδολογίες εκτίμησης επικινδυνότητας των συνδυασμένων μεταφορών.

Από την παρουσίαση των πρόσφατων μεθοδολογιών που αφορούν στην εκτίμηση της επικινδυνότητας της συνδυασμένης μεταφοράς HAZMAT, εξάγονται τα παρακάτω συμπεράσματα σχετικά με τις ομοιότητες ή διαφορές τους, και τα πιθανά πλεονεκτήματα ή κενά τους:

- ο Διαπιστώνεται ότι στις πρόσφατες μελέτες γίνεται προσπάθεια να μοντελοποιηθούν διατροφικά μεταφορικά συστήματα ρεαλιστικού μεγέθους (περιφέρειας ή χώρας) με στόχο τον σχεδιασμό που θα εξάγει τις βέλτιστες θέσεις των σταθμών μεταφόρτωσης και των λοιπών κόμβων σύνδεσης και τις βέλτιστες διαδρομές (οδικές και σιδηροδρομικές) από πλευράς κόστους και επικινδυνότητας. Μάλιστα τα προτεινόμενα μοντέλα στο σύνολο τους παράγουν εναλλακτικά ζεύγη τιμών κόστους- ρίσκου ανάλογα με τη βαρύτητα που επιλέγεται να δοθεί σε κάθε παράμετρο.
- ο Ως αποτέλεσμα προκύπτουν πληθώρα υπολογιστικών μοντέλων στα οποία εισάγονται δεδομένες/υποθετικές τιμές κόστους, επικινδυνότητας, εκτεθειμένου πληθυσμού, πιθανότητας ατυχημάτων ανά φορτίο ή

διαδρομή, καθώς και δεδομένα ζήτησης μεταφοράς, τύπου φορτίων κ.α. και εξάγονται αποτελέσματα μεταφορικού πλάνου και υπολογισμένου συνολικού κόστους και επικινδυνότητας.

- Επίσης ιδιαίτερη σημασία δίνεται στους σταθμούς μεταφόρτωσης και το ιδιαίτερο κόστος/επικινδυνότητα που παράγεται εντός τους εξαιτίας κυρίως της συμφόρησης και των ουρών αναμονής. Το κόστος /επικινδυνότητα σταθμών μοντελοποιείται ώστε να λαμβάνει υπόψη παράγοντες όπως την ικανότητα λειτουργίας τους, της ουρές αναμονής, το διαθέσιμο εξοπλισμό τους, τις διαδικασίες ρυμούλκησης -μεταφόρτωσης και την επιλογή θέσης τους.
- Για την μοντελοποίηση των προτάσεων τους οι μελετητές χρησιμοποιούν μοντέλα βελτιστοποίησης δύο παραγόντων που συνθέτονται από συνδυαστικούς αλγορίθμους και μαθηματικά μοντέλα περιορισμών, παραγωγής τυχαίων τιμών (ζήτησης, ή ατυχημάτων κ.α.), ουρών αναμονής κ.α., ενώ για την απόδοση λύσεων ζευγών της βέλτιστης ισορροπίας (trade off) χρησιμοποιείται το μοντέλο Pareto frontier.

5. Μελέτη περίπτωσης στον Ελληνικό σιδηροδρομικό άξονα

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζεται η εφαρμογή της κεντρικής μεθοδολογίας εκτίμηση της επικινδυνότητας HAZMAT, σε περίπτωση μελέτης μεταφοράς επικίνδυνων φορτίων στο Ελληνικό σιδηροδρομικό δίκτυο. Συγκεκριμένα επιλέγεται η μεθοδολογία υπολογισμού της αναμενόμενης επίπτωσης όπως παρουσιάστηκε από τους (Saccomanno, et al., 1990) και προσαρμόστηκε από τους (Verma & Verter, 2007) και (Verma, 2011) για τις σιδηροδρομικές μεταφορές επικίνδυνων φορτίων (βλέπε ενότητα 4.4) Η μεθοδολογία αυτή χρησιμοποιείται για το εμπορευματικό δρομολόγιο της ΤΡΑΙΝΟΣΕ από τον Σιδηροδρομικό Σταθμό Ικονίου πλησίον Πειραιά, προς τον Σιδηροδρομικό Σταθμό Διαλογής στην Θεσσαλονίκη.

Σύμφωνα με τα παραπάνω και τις συνθήκες της μεθοδολογίας που ήδη έχουν παρουσιαστεί εκτενώς στην ενότητα 4.4 αναφέρεται ότι στην παρούσα εφαρμογή, η επικινδυνότητα (Risk) κατά την σιδηροδρομική μεταφορά HAZMAT υπολογίζεται ως η αναμενόμενη επίπτωση ατυχήματος σιδηροδρομικής αμαξοστοιχίας που μεταφέρει HAZMAT και οδηγεί σε διαφυγή του φορτίου.

$$\text{Risk} = P \times C$$

Όπου, P η πιθανότητα ατυχήματος με διαφυγή HAZMAT και C η επίπτωση του ατυχήματος σε όρους εκτεθειμένου πληθυσμού.

Για την επίλυση του προβλήματος χρησιμοποιήθηκαν:

- (i) το λογισμικό ALOHA (έκδοσή 5.4.7, Sept 2016) το οποίο χρησιμοποιείται ευρέως στη Βόρεια Αμερική από τις αρμόδιες αρχές (όπως το U.S. EPA- Environmental Protection Agency, το Υπουργείο Μεταφορών ΗΠΑ και ΚΑΝΑΔΑ) στις περιπτώσεις μεγάλων ατυχημάτων από τη διαφυγή επικίνδυνων χημικών, περιλαμβανομένων σύννεφων τοξικών αερίων, φωτιών και εκρήξεων κλπ. Το λογισμικό ALOHA υπολογίζει τον ρυθμό διαρροής των επικίνδυνων ουσιών, την απειλούμενη ζώνη από το ατύχημα και κατά επέκταση τις απαραίτητες αποστάσεις εκκένωσης. (βλέπε και ενότητα 3.4)
- (ii) Το λογισμικό ExpertGPS, το οποίο παρέχει τη δυνατότητα σχεδιασμού σε υπόβαθρο χαρτών, καθώς και επεξεργασίας σχεδίου περιλαμβανομένου του σχεδιασμού buffer zones.

5.1 Περιγραφή και Παραδοχές Μελέτη περίπτωσης

Για τον καθορισμό της περίπτωσης μελέτης ακολουθείται η τακτική του δυσμενέστερου σεναρίου, όπου δηλαδή η περίπτωση που μελετάται να συντίθεται από τις δυσμενέστερες εκδοχές- μεταξύ των πιθανών - με στόχο τον υπολογισμό της μέγιστης πιθανής επικινδυνότητας στο συγκεκριμένο εμπορευματικό δρομολόγιο. Οι παραδοχές και τα δεδομένα της μελέτης περίπτωσης τεκμηριώνονται και παρουσιάζονται αντίστοιχα στις υποενότητες 5.1.1, 5.1.2, 5.2.

Έστω η εμπορευματική αμαξοστοιχία ΕΑ_τ με 36 βαγόνια πλατφόρμες που μεταφέρουν εμπορευματοκιβώτια και 2 βυτιοφόρα βαγόνια, η οποία εκτελεί το δρομολόγιο από τον εμπορευματικό σιδηροδρομικό σταθμό Ικονίου(Πειραιάς) έως τον εμπορευματικό σιδηροδρομικό σταθμό Διαλογής(Θεσσαλονίκη) χωρίς ενδιάμεσες στάσεις. Η αμαξοστοιχία καλείται να μεταφέρει ποσότητα 180 tn χλωρίου σε θερμοκρασία περιβάλλοντος η οποία αντιστοιχεί σε 2 υπό πίεση βυτία-βαγόνια τύπου DOT 105, χωρητικότητας 90tn το καθένα. Η αμαξοστοιχία δεν μεταφέρει οποιοδήποτε άλλο επικίνδυνο φορτίο. Σχετικά με την σύνθεση της αμαξοστοιχίας υποθέτουμε ότι τα δυο βυτία-βαγόνια τοποθετούνται ως 15^ο και 16^ο βαγόνι (δηλαδή στην 4^η υποδεκάδα του τραίνου).

Για το σενάριο του ατυχήματος λαμβάνουμε υπόψη ότι αρχικά το ένα βυτιοφόρο βαγόνι αστοχεί παρουσιάζοντας οπή 5in στο πυθμένα του, από την οποία διαρρέει και τελικά απελευθερώνεται όλο το χλώριο που περιέχει και πολύ σύντομα υπό την επιρροή του πρώτου βαγονιού αστοχεί και το δεύτερο βυτιοφόρο βαγόνι εκλύοντας ομοίως όλη την ποσότητα χλωρίου που περιέχει.

5.1.1. Παραδοχές εργασίας της περίπτωσης μελέτης

1. Η ΤΡΑΙΝΟΣΕ στα πλαίσια λειτουργίας της εκτελεί δρομολόγια μεταφοράς εμπορευματικών φορτίων στα τμήματα που περιγράφονται στον Πίνακας 5.7 (βλέπε ενότητα 5.2.1) Κυριότερη διαδρομή, ως προς την συχνότητα των δρομολογίων, είναι η διαδρομή από τον Εμπορευματικό Σιδηροδρομικό Σταθμό Ικονίου (πλησίον λιμένα Πειραιά) έως τον Εμπορευματικό Σιδηροδρομικό Σταθμό Διαλογής (πλησίον λιμένα Θεσσαλονίκης). Επιπλέον η διαδρομή αυτή παρουσιάζει αυξανόμενη ζήτηση όπως υποδηλώνεται από τον αυξανόμενο αριθμό ετήσιων δρομολογίων της τελευταίας πενταετίας (βλέπε Πίνακας 5.7). Για τους παραπάνω λόγους επιλέγεται το δρομολόγιο Ε.Σ.Σ Ικονίου- Ε.Σ.Σ Διαλογής να μελετηθεί ως περίπτωση στην παρούσα ενότητα.

2. Σχετικά με το μήκος της αμαξοστοιχίας η παραδοχή των συνολικά 38 βαγονιών (36 βαγόνια πλατφόρμες και δύο βυτιοφόρα βαγόνια) ακολουθεί τις προδιαγραφές του μέγιστου μήκος τραίνου και μέγιστου φορτίου που εφαρμόζει η ΤΡΑΙΝΟΣΕ (βλέπε Δεδομένα Αμαξοστοιχίας, ενότητα 5.2.1) προκειμένου να είναι συμβατή με τα όρια φορτίου του σιδηροδρομικού δικτύου.
3. Για την επιλογή του επικίνδυνου φορτίου της περίπτωσης μελέτης λήφθηκε υπόψη καταρχήν η πρόταση της (Verma, 2011) σύμφωνα με την οποία επιλέγεται να μελετηθεί η επίδραση μεταφοράς δηλητηριωδών αερίων (όπως π.χ. χλώριο, προπάνιο, αμμωνία) τα οποία όταν διαρρεύσουν μετατρέπονται σε αεροσωματίδια με την ιδιότητα να ταξιδεύουν σε πολύ μακρινές αποστάσεις-ιδιαίτερα στην περίπτωση δυσμενών καιρικών συνθηκών - προκαλώντας έτσι τοξική μόλυνση σε ευρύτερες περιοχές από ότι σε άλλα φαινόμενα όπως έκρηξης φωτιάς ή νέφους (βλέπε υποενότητα 3.3.1). Επιπλέον για την επιλογή του υλικού λήφθηκαν υπόψη τα στοιχεία της ΤΡΑΙΝΟΣΕ (βλέπε πίνακα 5.3, ενότητα 5.2.1) σύμφωνα με τα οποία το χλώριο αποτελεί φορτίο που έχει μεταφερθεί από το δίκτυο της το 2019, σε ποσότητα 180 tn. Συμπερασματικά επιλέγεται να μελετηθεί η επικινδυνότητα μεταφοράς χλωρίου (No CAS: 7782-50-5), ποσότητας 180 tn σε θερμοκρασία περιβάλλοντος. Το χλώριο ανήκει στη κλάση 2 των επικίνδυνων φορτίων και κάτω από κανονικές συνθήκες ατμοσφαιρικής πίεσης και θερμοκρασίας έχει τη μορφή πράσινο -κίτρινου αερίου με έντονη οξεία μυρωδιά.
4. Για τη μεταφορά του φορτίου της μελέτης υποθέτουμε ότι χρησιμοποιούνται δύο υπό πίεση βυτιοφόρα βαγόνια τύπου DOT 105 χωρητικότητας 90tn το καθένα, τα οποία μεταφέρουν το υγροποιημένο χλώριο. Σημειώνεται ότι τα υπό πίεση βυτιοφόρα σχεδιασμένα κάτω από τις πρότυπες προδιαγραφές DOT 105 και DOT 112 του Υπουργείου Μεταφορών των ΗΠΑ, χρησιμοποιούνται για την μεταφορά υγροποιημένων συμπιεσμένων αερίων υπό πίεση καθώς και για κάποια χαμηλής- πίεσης, υψηλής- επικινδυνότητας υλικών (πηγή: (Railway Supply Institute, 2017) Οι εσωτερικές διαστάσεις των βυτιοφόρων βαγονιών DOT 105, λαμβάνονται ως : διάμετρος 2,6m και μήκος 10,80m, ((Oxychem, 2012)),
5. Σχετικά με τη σύνθεση της αμαξοστοιχίας ακολουθούνται οι παραδοχές του μοντέλου υπολογισμού της (Verma, 2011), καθώς και ο κανονισμός φόρτωσης αμαξοστοιχιών που εφαρμόζει η ΤΡΑΙΝΟΣΕ. Συγκεκριμένα γίνονται οι παραδοχές του μοντέλου (Verma, 2011) (i)ότι όλα –στην περίπτωση μελέτης μας και τα δύο- HAZMAT βαγόνια βρίσκονται συγκεντρωμένα σε ένα τμήμα της αμαξοστοιχίας (ii) ότι ορισμένες θέσεις του τραίνου έχουν μεγαλύτερο ποσοστό εκτροχιασμού και διαρροής, οι δε πιθανότητες αυτές έχουν υπολογιστεί ανά υποδεκάδα της αμαξοστοιχίας, εννοώντας δέκα ίσα

μερίσματα της αμαξοστοιχίας (βλέπε παραδοχή 3, ενότητας 5.1.2 για αμαξοστοιχίες με έως 40 βαγόνια). Επίσης με βάση τα στοιχεία της ΤΡΑΙΝΟΣΕ αποκλείονται η αρχή και το τέλος της αμαξοστοιχίας (βλέπε δεδομένα αμαξοστοιχίας, ενότητα 5.2.1) Λαμβάνοντας την επιτρεπόμενη δυσμενέστερη εκδοχή για την περίπτωση της μελέτης μας, επιλέγονται οι θέσεις 15 και 16 (4^η υποδεκάδα) ως οι πιο πιθανές και άρα πιο επικίνδυνες να εκτροχιαστούν και να διαρρεύσουν.

6. Η υπόθεση του σεναρίου ατυχήματος που εξετάζεται, λαμβάνει οπή 5 in στο πυθμένα του βυτιοφόρου βαγονιού. Η θεώρηση αυτή βασίζεται σε μια σειρά προσομοιώσεων σεναρίων διαφορετικών οπών (από 1in έως 20 in) που επιλύθηκαν με το λογισμικό ALOHA, οι οποίες οδηγούν σε διαφορετικούς ρυθμούς διαρροής χλωρίου και διαφορετικές διαμέτρους απειλούμενων ζωνών και παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.1 Από τις επιλύσεις αυτές διαπιστώθηκε ότι για οπή ίση και μεγαλύτερη των 5in η απειλούμενη ζώνη που υπολογίζει το ALOHA δεν αυξάνεται περαιτέρω, καθώς και ότι ο χρόνος εκκένωσης του βυτίου παύει να μειώνεται αισθητά. Επομένως κρίνεται ασφαλές να ληφθεί υπόψη οπή 5in και όχι μεγαλύτερη δεδομένου ότι δεν επηρεάζεται περαιτέρω το αποτέλεσμα. Επίσης θεωρούμε ότι η οπή βρίσκεται στον πυθμένα του βαγονιού προκαλώντας τη διαφυγή όλης της ποσότητας χλωρίου που περιέχεται.

Πίνακας 5.1: Προσομοιώσεις διαρροής χλωρίου από οπή διαφορετικών διαμέτρων, με χρήση ALOHA

Διάμετρος Ρωγμής	Ρυθμός Διαρροής	Χρόνος Αδεάσματος	Απειλούμενη Ζώνη	Απελευθερωμένη Ποσότητα
(in)	(Kg/min)	(min)	km	kg
1	658,00	>1h	2,2	38.671,00
2	2.620,00	33	5	81.647,00
3	5.890,00	15	6	81.647,00
4	10.500,00	8	6,1	81.647,00
5	16.300,00	5	6,2	81.647,00
6	23.400,00	4	6,2	81.647,00
(in)	(Kg/sec)	(min)	km	kg
20	1.360,00	1	6,2	81.647,00

7. Επειδή η αλληλεπίδραση μεταξύ των επικίνδυνων φορτίων δεν είναι πλήρως γνωστή, γίνεται η δυσμενέστερη υπόθεση ότι η αστοχία του πρώτου βαγονιού και η διαρροή του χλωρίου θα πυροδοτήσει αστοχία και στο δεύτερο βαγόνι προκαλώντας τη διαφυγή χλωρίου και από το δεύτερο βυτιοφόρο βαγόνι [παραδοχή από (Verma, 2011)] . Επομένως υποθέτουμε ότι θα διαφύγει όλο το φορτίο που μεταφέρεται, από κάθε HAZMAT βαγόνι.

5.1.2. Παραδοχές του μοντέλου υπολογισμού Επικινδυνότητας HAZMAT:

- 1. Τυπολόγιο υπολογιστικού μοντέλου:** Για την επίλυση της παρούσα περίπτωση μελέτης γίνεται χρήση του μοντέλου υπολογισμού της επικινδυνότητας HAZMAT που περιγράφεται στην ενότητα 4.4. Το τυπολόγιο της μεθοδολογίας που ακολουθήθηκε στην παρούσα περίπτωση μελέτης, δίνεται στους Πίνακες 5.2 και Πίνακας 5.3. Συνοπτικά υπενθυμίζεται ότι προκειμένου να υπολογιστεί η επικινδυνότητα αρκεί να υπολογιστούν η πιθανότητα ατυχήματος με εκτροχιασμό βαγονιού HAZMAT και διαρροή του, και η επίπτωση $C(A_i)$ της διαρροής HAZMAT σε κάθε τμήμα ℓ της διαδρομής (βλέπε εξίσωση(1), πίνακα 5.2). Για τον υπολογισμό της πιθανότητας ατυχήματος με εκτροχιασμό βαγονιού HAZMAT και διαρροή του $P(A_i)$ αρκεί να υπολογιστούν ο δείκτης ατυχημάτων AR_i σε κάθε τμήμα ℓ της διαδρομής και οι εξαρτημένες πιθανότητες εκτροχιασμού βαγονιού της αμαξοστοιχίας μελέτης, εκτροχιασμού βαγονιού HAZMAT και διαρροής HAZMAT (βλέπε εξίσωση(3), Πίνακας 5.2). Η επίπτωση σε κάθε τμήμα ℓ ισούται με τον εκτεθειμένο στον κίνδυνο πληθυσμό, για τον υπολογισμό του οποίου είναι αναγκαίος πρώτα ο υπολογισμός της απόστασης επίδρασης του ατυχήματος (βλέπε εξίσωση(9), Πίνακας 5.2), το οποίο τελικά θα εφαρμοστεί κατά μήκος και εκατέρωθεν της σιδηροδρομικής γραμμής δημιουργώντας μία ζώνη επιρροής του ενδεχόμενου ατυχήματος (buffer zone). Ο πληθυσμός που περικλείεται στην ζώνη επιρροής αποτελεί τον εκτιθέμενο στον κίνδυνο πληθυσμό. (βλέπε εξίσωση(6), Πίνακας 5.2). Για αναλυτικότερη περιγραφή της μεθοδολογίας παραπέμπουμε στην υποενότητα 4.4)

Πίνακας 5.2: Τυπολόγιο μεθοδολογίας(πηγή: (Verma, 2011), ίδια επεξεργασία)

A/A	ΕΞΙΣΩΣΗ
(1)	$Societal Risk = \sum P(A_i) \times C(A_i)$
(2)	$Societal Risk = P(A) \times \sum C(A_i)$
(3)	$P(A_i) = AR_i \times P(D^i A_i) \times P(H D^i, A_i) \times P(R H, D^i, A_i)$
(4)	$P(A) = AR \times L \times P(D^i A_i) \times P(H D^i, A_i) \times P(R H, D^i, A_i)$
(5)	$\sum C(A_i) = \sum PE_i$
(6)	$\sum PE_i = Area(X') p(V_i)$
(7)	$V_i = \sum v_i^n$
(8)	$C(x) = (\sum n_i Q_i) / \pi u a c x^b x^d$
(9)	$X' = {}^{(b+d)} \sqrt{[(\sum n_i Q_i) / \pi u a c \hat{C}]}$

Πίνακας 5.3: Σύμβολα εξισώσεων μεθοδολογίας

ΣΥΜΒΟΛΟ	ΕΠΕΞΗΓΗΣΗ	ΜΟΝ. ΜΕΤΡΗΣΗΣ
Societal Risk SR	Κοινωνική Διακινδύνευση ανά δρομολόγιο	άτομα
$P(A_\ell)$	Πιθανότητα σιδηρ. ατυχήματος A της ΕΑ _Τ με εκτροχιασμό βαγονιού ΕΦ και διαρροή , στο τμήμα ℓ της διαδρομής	-
$P(A)$	Πιθανότητα σιδηρ. ατυχήματος A της ΕΑ _Τ με εκτροχιασμό βαγονιού ΕΦ και διαρροή , στο σύνολο της διαδρομής	-
$C(A_\ell)$	Επίπτωση σιδηροδρ. ατυχήματος A στο τμήμα ℓ της διαδρομής	άτομα
AR_ℓ	Δείκτης ατυχημάτων στο σιδηροδρομικό τμήμα ℓ της διαδρομής	εκτροχιασμοί ανά διανυθέντα Km
AR	Δείκτης ατυχημάτων στο σιδηροδρομικό δίκτυο (accident rate)	-
$P(D_i A_\ell)$	Πιθανότητα εκτροχιασμού βαγονιού της i θέσης του τρένου, εξαπίας ατυχήματος A στο ℓ	-
$P(H D_i, A_\ell)$	Πιθανότητα εκτροχιασμού HAZMAT βαγονιού της i θέσης ,εξαπίας ατυχήματος A στο ℓ	-
$P(R H, D_i, A_\ell)$	Πιθανότητα διαρροής ΕΦ από εκτροχιασμένο HAZMAT βαγονι της i θέσης εξαπίας ατυχήματος A στο ℓ	-
PE_ℓ	Εκτειθέμενος πληθυσμός εξαπίας διαρροής ΕΦ από HAZMAT βαγόνια εξαπίας του ατυχήματος A στο ℓ	-
X'	Απόσταση εκκένωσης ή ακτίνα περιοχής επιδρασης ατυχήματος	m
$P(V_\ell)$	πυκνότητα πληθυσμού στο τμήμα ℓ της διαδρομής	άτομα/ km ²
V_ℓ	Όγκος του διαφεύγοντος HAZMAT εξαπίας ατυχήματος στο ℓ	tn
V_ℓ^n	όγκος του διαφεύγοντος HAZMAT από το n βαγόνι λόγω ατυχήματος στο ℓ	tn
Q_i	ο ρυθμός διαρροής ΕΦ	mg/sec
$C(x)$	η συγκέντρωση σε απόσταση x από την πηγή	ppm
\hat{C}	η οριακή τιμή τοξικής συγκέντρωσης χλωρίου	ppm
u	μέση ταχύτητα ανέμου	m/sec
a	a, b, c, d : είναι παράμετροι διασποράς που καθορίζονται από την κατηγορία ατμοσφαιρικής σταθερότητας όπως κάθε κατηγορία προσδιορίζεται από τον συνδυασμό της ηλιακής ακτινοβολίας, συννεφιάς, υγρασίας και επιδρασης με ταχύτητα ανέμου.συγκέντρωσης.	-
b		-
c		-
d		-
n	ο αριθμός των HAZMAT βαγονιών που διαρρέουν.	-

- 2. Δείκτης ατυχημάτων:** Σχετικά με τον υπολογισμό του δείκτη ατυχημάτων για κάθε τμήμα ℓ της μελετούμενης διαδρομής και δεδομένου ότι στην Ελλάδα δεν διατηρούνται επίσημα λεπτομερή στοιχεία σιδηροδρομικών ατυχημάτων ανά τμήμα του σιδηροδρομικού δικτύου, υιοθετείται η παραδοχή της (Verma, 2011) σύμφωνα με την οποία η πιθανότητα ατυχήματος $P(A_\ell)$ στο τμήμα ℓ της διαδρομής ισούται με το δείκτη ατυχημάτων $P(A)$ για το σιδηροδρομικό δίκτυο ίδιου τύπου. Η παραδοχή αυτή βασίζεται στη θεώρηση της πολύ μικρής κλίμακας των δεικτών σιδηροδρομικού ατυχήματος (της τάξης του 10^{-6} έως 10^{-5}), επομένως είναι εύλογη η προσέγγιση του ενιαίου ποσοστού ατυχήματος με αμελητέο σφάλμα που εφαρμόστηκε από τους (Erkut & Verter, 1998) για ατυχήματα στο οδικό δίκτυο. Στην παρούσα περίπτωση μελέτης, ο δείκτης ατυχημάτων στο πεδίο υπολογίζεται ετησίως σε ατυχήματα ανά διανυθέντα χιλιόμετρα, βασισμένος στα πραγματικά στοιχεία ετήσιων εκτροχιασμών πεδίου της ΤΡΑΙΝΟΣΕ για τα έτη 2015 έως 2019 και ετήσιων διανυθέντων χιλιομέτρων (Πίνακας 5.7, Πίνακας 5.8) Τελικά ο δείκτης ατυχημάτων πεδίου που εφαρμόζεται, προκύπτει ως ο μέσος όρος των ετήσιων δεικτών της τελευταίας δεκαετίας.
- 3. Εξαρτημένες πιθανότητες εκτροχιασμών και διαρροής:** Σύμφωνα με τη (Verma, 2011) δεδομένης της αλυσιδωτής φύσης ενός σιδηροδρομικού ατυχήματος που θα οδηγούσε στη διαρροή του επικίνδυνου φορτίου, οι πιθανότητες ατυχήματος εκτροχιασμού ενός βαγονιού HAZMAT και διαρροής του, υπολογίζονται σύμφωνα με το θεώρημα του Baye, ως εξαρτημένες πιθανότητες. Στην παρούσα περίπτωση μελέτης για τον καθορισμό των εξαρτημένων πιθανοτήτων $P(D_i|A_\ell)$ εκτροχιασμού βαγονιού της θέσης i του τραίνου, $P(H|D_i, A_\ell)$ εκτροχιασμού HAZMAT βαγονιού της θέσης i και $P(R|H, D_i, A_\ell)$ διαρροής ΕΦ από το εκτροχιασμένο βαγόνι i , εξαιτίας ατυχήματος A στο τμήμα ℓ της διαδρομής, υιοθετούνται τα αποτελέσματα της πρότασης (Verma, 2011) όπως παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.4 και αναλυτικότερα περιγράφεται στην υποενότητα 4.1. Συγκεκριμένα από τον Πίνακα 5.4 διαπιστώνεται ότι οι εξαρτημένες πιθανότητες εξαρτώνται από την θέση i του HAZMAT βαγονιού στη σύνθεση του τραίνου και το μήκος του τραίνου. Επομένως για την παρούσα περίπτωση μελέτης της αμαξοστοιχίας ΕΑτ θεωρώντας αφενός ότι η αμαξοστοιχία δεν ξεπερνά τα 40 βαγόνια, αφετέρου ότι τα βυτιοφόρα βαγόνια τοποθετούνται στην δυσμενέστερη επιτρεπόμενη θέση όπου οι εξαρτημένες πιθανότητες λαμβάνουν τις μεγαλύτερες τιμές τους, επιλέγεται η 4^η υποδεκάδα και οι αντίστοιχες τιμές πιθανοτήτων.

Πίνακας 5.4: Τιμές εξαρτημένων πιθανοτήτων στο πεδίο για μικρό τραίνο (πηγή: (Verma, 2011))

Θέση i εκτροχ. βαγονιού στην υποδεκάδα του τραίνου	$P(D_i A_i)$	$P(H D_i, A_i)$	$P(R H, D_i, A_i)$
1η	0,1667	0,0668	0,0093
2η	0,0957	0,0609	0,0047
3η	0,0952	0,0398	0,0038
4η	0,0908	0,076	0,0112
5η	0,0938	0,0905	0,0016
6η	0,0877	0,0611	0,0075
7η	0,0783	0,0853	0,0009
8η	0,0839	0,0726	0,0073
9η	0,0841	0,072	0,0076
10η	0,1239	0,0625	0,0045

4. Πηγή διαρροής χλωρίου: Όπως ήδη αναφέρθηκε στην παραδοχή 8 της παραγράφου 5.1.1, στην παρούσα περίπτωση μελέτης θεωρούμε ότι όλη η ποσότητα του μεταφερόμενου χλωρίου θα διαφύγει. Για να προσομοιωθεί το σενάριο αυτό και να υπολογιστεί η επίδραση του, στο μοντέλο της (Verma, 2011) γίνονται οι παραδοχές: (i) όλες οι πηγές διαρροής του χλωρίου βρίσκονται στη μέση του μήκους των HAZMAT βαγονιών (ii) ότι η μόλυνση από μια συστοιχία πηγών μπορεί να μοντελοποιηθεί επικαλύπτοντας τα ίχνη της μόλυνσης από πολλαπλές πηγές διαρροής. (Pasquill & Smith, 1983) και (Arya, 1999). Οι παραδοχές αυτές χρησιμοποιούνται στη διατύπωση της εξίσωσης (8) υπολογισμού της συγκέντρωσης τοξικότητας από την πολλαπλή διαρροή βυτίων χλωρίου.

5. Σενάριο ατυχήματος: Η διαρροή χλωρίου της παρούσας περίπτωσης μελέτης, οδηγεί στη διασπορά τοξικού νέφους. Ο υπολογισμός της χωρικής κατανομής, ή αλλιώς της διασποράς του διαφεύγοντος αερίου και το επίπεδο τοξικής συγκέντρωσης προσδιορίζεται με τη χρήση του Γκαουσιανού μοντέλου διασποράς (Gaussian plume model-GPM), σύμφωνα με την πρόταση των (Verma & Verter, 2007) και (Verma, 2011) (βλέπε ενότητα 4.1). Υπενθυμίζεται ότι η τιμή συγκέντρωσης τοξικότητας σε απόσταση X από την πηγή διαρροής εξαρτάται από τον ρυθμό διαρροής του αερίου, την ποσότητα των πηγών διαρροής, από την ταχύτητα ανέμου καθώς και από το επίπεδο ατμοσφαιρικής αστάθειας, όπως απεικονίζεται στην εξίσωση (8)

υπολογισμού της συγκέντρωσης GPM. Σημειώνεται ότι οι ατμοσφαιρικές συνθήκες απεικονίζονται από τους συντελεστές a, b, c, d. (Pasquill & Smith, 1983). Στην παρούσα περίπτωση μελέτης, για την προσομοίωση της διασποράς του χλωρίου χρησιμοποιείται το λογισμικό ALOHA το οποίο ομοίως βασίζεται στο Γκαουσιανό μοντέλο διασποράς.

- 6. Ατμοσφαιρικές συνθήκες:** Στον Πίνακα 5.5 απεικονίζονται τα επίπεδα ατμοσφαιρικής αστάθειας κατά (Pasquill & Smith, 1983) όπως προσδιορίζονται από τον συνδυασμό της ηλιακής ακτινοβολίας, της νέφωσης, της υγρασίας, της θερμοκρασίας και την επίδραση τους με την ταχύτητα του ανέμου. Δεδομένου ότι στην περίπτωση μελέτης που εξετάζουμε δεν μπορούν να προσδιοριστούν οι ατμοσφαιρικές συνθήκες που θα επικρατούν στο ενδεχόμενο ατύχημα, εξετάζονται μια σειρά σεναρίων τα οποία επιλύονται μέσω του ALOHA. Τα αποτελέσματα και τα συμπεράσματα των επιλύσεων παρουσιάζονται στην ενότητα 5.3. Τελικά για τον υπολογισμό της επικινδυνότητας του δρομολογίου της μελέτης μας λαμβάνουμε υπόψη δύο σενάρια: (i) επίπεδο ατμοσφαιρικής αστάθειας D και άνεμο νότιο με ταχύτητα $u=2,5\text{m/sec}$, το οποίο αντιστοιχεί στο σενάριο του νυχτερινού δρομολογίου(έναρξη 8.00μμ) με δυσμενείς ατμοσφαιρικές συνθήκες νέφωσης και υγρασίας (ii) επίπεδο ατμοσφαιρικής αστάθειας C και άνεμο νότιο με ταχύτητα $u=2,5\text{m/sec}$ το οποίο αντιστοιχεί στο σενάριο του πρωινού δρομολογίου με τις ίδιες δυσμενείς ατμοσφαιρικές συνθήκες. Σημειώνεται ότι η επιλογή του νότιου ανέμου αποτελεί τη δυσμενέστερη εκδοχή δεδομένου ότι το ALOHA λαμβάνει υπόψη του τη γεωγραφική θέση(γεωγραφικές συντεταγμένες) του σημείου ατυχήματος. Άλλωστε η κατεύθυνση του νότιου ανέμου θα επηρέαζε την πολυπληθέστερη ηπειρωτική Ελλάδα.

Πίνακας 5.5: Κατηγορίες ατμοσφαιρικής αστάθειας (πηγή: ALOHA)

Ταχύτητα Ανέμου	Ημέρα			Νύχτα	
	Ισχυρή ηλιοφάνεια	Μέση ηλιοφάνεια	Ελαφρά ηλιοφάνεια	Νέφωση <50%	Νέφωση > 50%
< 2	A	A-B	B	E	F
2 – 3	A-B	B	C	E	F
3 – 5	B	B-C	C	D	E
5 – 6	C	C-D	D	D	D
>6	C	D	D	D	D

- 7. Ρυθμός διαρροής χλωρίου:** Γενικά ο ρυθμός διαρροής του επικίνδυνου φορτίου από την πηγή, εξαρτάται από τον όγκο και τον τύπο του HAZMAT, τη διάμετρο και τη θέση της οπής –ρωγμής και τον όγκο του βυτιοφόρου.

Στην παρούσα περίπτωση μελέτης για τον υπολογισμό του ρυθμού διαρροής γίνεται χρήση του λογισμικού ALOHA. Σε πρώτο στάδιο γίνονται μια σειρά προσομοιώσεων για διαφορετικές διαμέτρους οπών προκειμένου να εξακριβωθεί η ακριβής επίδραση της διάστασης της οπής στο ρυθμό διαρροής και την διάμετρο της απειλούμενης ζώνης και να επιλεγεί η τελική διάσταση για την επίλυση του προβλήματος μας. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων διαρροής ενός βαγονιού υγροποιημένου χλωρίου σε επίπεδο ατμοσφαιρικής αστάθειας D και ταχύτητα ανέμου 2,5m/sec εμφανίζονται στον Πίνακα 5.1 και περιγράφονται αναλυτικότερα στην ενότητα 5.3. Τελικά για τον υπολογισμό της επικινδυνότητας της περίπτωσης μελέτης μας, επιλέγεται οπή διαμέτρου 5in στον πυθμένα κάθε βυτιοφόρου βαγονιού η οποία οδηγεί σε χρόνο εκκένωσης του χλωρίου σε 5 min, χρόνος πολύ μικρότερος από το χρόνο αντίδρασης έκτακτης ανάγκης.

- 8. Καθορισμός τοξικής συγκέντρωσης:** Προκειμένου να υπολογιστεί η περιοχή επίδρασης του ατυχήματος από την εξίσωση (7) του Πίνακα 5.2, θα πρέπει να ενσωματωθεί η οριακή τιμή συγκέντρωσης χλωρίου στην οποία μπορεί ο πληθυσμός να εκτεθεί χωρίς να διατρέχει η ζωή και η υγεία του κίνδυνο. Όπως αναλυτικά έχει ήδη περιγραφεί στην ενότητα 3.2.2, παγκοσμίως εφαρμόζονται μια σειρά συστημάτων οριακών τιμών *οξείας ή σπάνιας* έκθεσης πληθυσμού σε συγκεντρώσεις αερομεταφερόμενων χημικών ουσιών. Στην Ελλάδα δεν υπάρχει θεσμοθετημένο σχετικό σύστημα *οξείας ή σπάνιας έκθεσης*, αντιθέτως ισχύει το ΠΔ 90/1999 περί ανώτατων οριακών τιμών έκθεσης *των εργαζομένων* σε ορισμένους χημικούς παράγοντες. Οι τιμές αυτές αφορούν στη συνεχή και μακροχρόνια έκθεση των εργαζομένων σε επικίνδυνη ουσία, ως εκ τούτου είναι πολύ μικρότερες από τις αντίστοιχες τιμές *οξείας ή σπάνιας έκθεσης* (βλέπε Πίνακα 5.6) Στην περίπτωση μελέτης μας υιοθετείται, το σύστημα Acute Exposure Guideline Levels που αναπτύχθηκε από την Υπηρεσία Προστασία Περιβάλλοντος των ΗΠΑ (US EPA). Επιλέγεται το σύστημα αυτό υπό την έλλειψη αντίστοιχου θεσμοθετημένου συστήματος στην Ελλάδα, αφενός διότι το σύστημα AEGLs θεωρείται πλήρες (δηλαδή καλύπτει το σύνολο των επικίνδυνων ουσιών) αφετέρου διότι είναι ιδιαίτερα δημοφιλές και εφαρμόζεται στην Ευρωπαϊκή Ένωση (βλέπε ενότητες 3.2.2 & 3.2.3). Συγκεκριμένα για την επίλυση του προβλήματος μας λαμβάνεται υπόψη το επίπεδο AEGL- 3 στην περίπτωση του χλωρίου (7782–50–5), όπου η οριακή τιμή είναι 20ppm για 60min. Σημειώνεται ότι το ALOHA δίνει εκτός του AEGL, τη δυνατότητα χρήσης και των συστημάτων ERPG, PAC, IDLH, ή προσωπικής επιλογής του χρήστη.

Πίνακας 5.6: Οριακές τιμές έκθεσης σε χλώριο στην Ελλάδα και στις ΗΠΑ

Δηλητηριώδες αέριο Χλώριο (No CAS: 7782-50-5)					
Για Ελλάδα (πηγή: https://www.ypakp.gr/uploads/files/2725.pdf)					
Ανώτ. οριακή τιμή έκθεσης εργαζομένων (κατά ΠΔ 90/1999) = 1ppm για 15min ή 3mg/m ³					
Για ΗΠΑ- μακροχρόνια εκθεση(πηγή: https://www.cdc.gov/niosh/idlh/7782505.html)					
NIOSH REL 0.5 ppm 15-minute CEILING					
Revised IDLH: 10 ppm					
Για ΗΠΑ- οξεία εκθεση (πηγή: https://www.epa.gov/aegl/chlorine-results-aegl-program)					
Final AEGLs for chlorine (in parts per million)					
	10 minutes	30 minutes	60 minutes	4 hours	8 hours
AEGL-1	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50
AEGL-2	2.8	2.8	2.0	1.0	0.71
AEGL-3	50	28	20	10	7.1

9. Περιοχής επίδρασης ατυχήματος: Το μήκος Χ της περιοχής επίδρασης από τη διαρροή χλωρίου μπορεί να υπολογιστεί από την εξίσωση (7) του Πίνακα 5.2. Εναλλακτικά η περιοχή επίδρασης ατυχήματος υπολογίζεται μέσω ALOHA με την επιλογή χρήσης του Γκαουσιανού Μοντέλου Διασποράς και για επίπεδο AEGL-3 συγκέντρωσης αεροσωματιδίων χλωρίου. Στην παρούσα περίπτωση μελέτης, τελικά υπολογίζονται δύο απειλούμενες ζώνες που αντιστοιχούν στα δύο τελικά σενάρια ατμοσφαιρικής αστάθειας. Το μήκος κάθε απειλούμενης ζώνης (threat zone) εφαρμόζεται κατά μήκος της χάραξης του σιδηροδρομικού δικτύου του δρομολογίου μελέτης προκειμένου να προκύψει τελικά η ζώνη επιρροής του πιθανού ατυχήματος για τα δύο σενάρια ατμοσφαιρικής αστάθειας.

5.2 Δεδομένα μελέτης περίπτωσης

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται τα πραγματικά στοιχεία της περίπτωσης μελέτης που εξετάζουμε όπως ελήφθησαν από την ΤΡΑΙΝΟΣΕ, την ΕΛΣΤΑΤ και την πλατφόρμα δεδομένων GEODATA.

5.2.1. Δεδομένα από ΤΡΑΙΝΟΣΕ

Από την ΤΡΑΙΝΟΣΕ λήφθηκε πληροφορία σχετικά με τα:

- 1. Δεδομένα εμπορευματικών δρομολογίων** ετών 2015 έως 2019, δηλαδή περιγραφή, ποσότητα και αποστάσεις των εμπορευματικών δρομολογίων της τελευταίας πενταετίας (βλέπε Πίνακας 5.7). Ειδικά για το υπό μελέτη

δρομολόγιο Ε.Σ.Σ Ικονίου- Ε.Σ.Σ Διαλογής, είναι συνολικά 552Km, έχει σημείο εκκίνησης τον Εμπορευματικό Σιδηροδρομικό Σταθμό Ικονίου, στη συνέχεια διέρχεται από το Θριάσιο Πεδίο και κινείται έως το Εμπορευματικό Σιδηροδρομικό Σταθμό Διαλογής, διερχόμενο από τους νομούς Αττικής, Βοιωτίας, Φθιώτιδας, Λάρισας, Πιερίας, Ημαθίας και Θεσσαλονίκης χρησιμοποιώντας το κοινό σιδηροδρομικό δίκτυο Αθήνας-Θεσσαλονίκης, χωρίς ενδιάμεσες στάσεις. Το δρομολόγιο εκτελείται βραδινή ώρα(εκκίνηση 8.00μμ) και πρωινή ώρα (εκκίνηση 12.00π.μ)

Πίνακας 5.7: Ετήσια δρομολόγια 2015-2019(πηγή: ΤΡΑΙΝΟΣΕ,2020)

code	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΔΡΟΜΟΛΟΓΙΟΥ	ΑΠΟΣΤΑΣΗ	ΕΤΗΣΙΑ ΔΡΟΜΟΛΟΓΙΑ				
			2015	2016	2017	2018	2019
	ΕΚΚΙΝΗΣΗ -ΠΡΟΟΡΙΣΜΟΣ	(Km)					
[1]	Σ. Σ. Θριάσιου (Ασπρόπυργος) – Σ. Σ. Διαλογής	528	116	106	159	183	183
[2]	Σ. Σ. Διαλογής (Θεσσαλονίκη) – Σ. Σ. Εδομένης	75	462	422	636	730	1460
[3]	Σ. Σ. Ικονίου (Πλησίον Πειραιά & Θριάσιου) – Σ. Σ. Διαλογής	552	231	211	318	365	730
[4]	Σ. Σ. Διαλογής (Θεσσαλονίκη)- Σ. Σ. Θριάσιου	528	15	24	138	150	183
[5]	Σ. Σ. Εδομένης (Διασυννοριακός) - Σ. Σ. Διαλογής	75	60	96	550	600	1460
[6]	Σ. Σ. Διαλογής - Σ. Σ. Ικονίου (Πλησίον Πειραιά & Θριάσιου)	552	30	48	275	300	730

2. Ιστορικά δεδομένα ατυχημάτων πεδίου της τελευταίας 5ετίας. (βλέπε Πίνακας 5.8)

Πίνακας 5.8: Εκτροχιασμοί πεδίου περιόδου 2015-2019 (Πηγή: ΤΡΑΙΝΟΣΕ, 2020)

ΕΤΟΣ	Εκτροχιασμοί εμπορευματικών αμαξοστοιχιών ΣΤΟ ΠΕΔΙΟ
	(εκτροχιασμοί)
2015	5
2016	5
2017	6
2018	3
2019	1

3. Δεδομένα κλάσεων και ποσοτήτων HAZMAT που μεταφέρονται στο μεταφορικό δίκτυο της και η μέση ετήσια μεταφερόμενη ποσότητα (Πίνακας 5.9) Σημειώνεται ότι τα επικίνδυνα φορτία μεταφέρονται μέσω των εμπορευματικών αμαξοστοιχιών.

Πίνακας 5.9: Δεδομένα HAZMAT έτους 2019 (Πηγή: ΤΡΑΙΝΟΣΕ, 2020)

ΚΛΑΣΗ	ΕΙΔΟΣ	ΕΠΙΤΡΕΠΕΤΑΙ	ΜΕΣΗ ΕΤΗΣΙΑ
			ΠΟΣΟΤΗΤΑ (tn)
1	Εκρηκτικές ουσίες και είδη	ΌΧΙ	-
2	Αέρια	ΝΑΙ	180
3	Εύφλεκτα υγρά	ΝΑΙ	26000
4.1	Εύφλεκτα στερεά, κλπ	ΝΑΙ	100
4.2	Ουσίες αυτό-αναφλεγόμενες	ΝΑΙ	100
4.3	Ουσίες σε επαφή με νερό εκπέμπουν εύφλεκτα αέρια	ΝΑΙ	1600
5.1	Οξειδωτικές ουσίες	ΝΑΙ	200
5.2	Οργανικά υπεροξειδία	ΝΑΙ	300
6.1	Τοξικές ουσίες	ΝΑΙ	1500
6.2	Μολυσματικές ουσίες	ΝΑΙ	100
7	Ραδιενεργή ύλη	ΝΑΙ	100
8	Διαβρωτικές ουσίες	ΝΑΙ	26000
ΣΥΝΟΛΟ			56180

4. Δεδομένα αμαξοστοιχίας, δηλαδή τύπος βαγονιών που χρησιμοποιεί η ΤΡΑΙΝΟΣΕ, μέγιστο μήκος και βάρος αμαξοστοιχίας, σύνθεση αμαξοστοιχίας, μη επιτρεπόμενες θέσεις βυτιοφόρων βαγονιών που μεταφέρουν χλώριο. Συγκεκριμένα ισχύει ότι:

- Η ΤΡΑΙΝΟΣΕ παρέχει δυνατότητα χρήσης πολυτροπικού εμπορευματικού τραίνου (intermodal cargo shuttle) για μεταφορά εμπορευματοκιβωτίων (containers 20,40 & 45 ft) ή δεξαμενών, μεμονωμένων συμβατικών βαγονιών, ή πλήρες τραίνου (αμαξοστοιχία με μεταφερόμενο βάρος έως 750tn)
- Το μέγιστο μήκος τραίνου είναι 120 άξονες ή 550m μήκος και το μέγιστο φορτίο 1200tn ή έως 38 containers 40 ft (ή 76 TEUs)
- Χρησιμοποιούνται βαγόνια τύπου πλατφόρμα, κλειστά βαγόνια, ανοικτά βαγόνια χύδην, βυτιοφόρα, βαγόνια δεξαμενών. Τα βαγόνια είναι 2 αξόνων, 4 αξόνων και 6 αξόνων. Μέγιστο φορτίο 20tn ανά άξονα.
- Για τη διαμόρφωση της αμαξοστοιχίας ακολουθείται ο κανονισμός φόρτωσης αμαξοστοιχιών. Ειδικά για την περίπτωση μεταφοράς

χλωρίου προκύπτει από τον κανονισμό ότι αυτό δεν θα πρέπει να τοποθετείται στην αρχή ή στο τέλος της σύνθεσης της αμαξοστοιχίας. Επίσης δεν θα πρέπει να γειτνιάζει με καύσιμα, ή οποιοδήποτε άλλο εύφλεκτο επικίνδυνο εμπόρευμα, καθώς το χλώριο πέρα από τοξικό αέριο και οξειδωτικό είναι και πυροδυναμωτικό.

5.2.2. Δεδομένα από πλατφόρμα GEODATA

Η πλατφόρμα GEODATA αποτελεί ένα εθνικό κατάλογο ανοικτών δεδομένων που προσφέρει ανοικτά γεωχωρικά δεδομένα.

Ο σχεδιασμός του σιδηροδρομικού τμήματος Ε.Σ.Σ Ικονίου- ΕΣΣ έγινε με τη χρήση του λογισμικού ExpertGPS, λαμβάνοντας στοιχεία χιλιομετρικών θέσεων γραμμής και ορίων νομών από την πλατφόρμα geodata. [<https://geodata.gov.gr/dataset/siderodromiko-diktuo-elladas>, και <https://geodata.gov.gr/dataset/oria-nomon-el-stat/resource/26f566c5-d94d-4652-89ea-66021183d321>] Η σύνθεση των πληροφοριών σε κοινό υπόβαθρο είναι αποτέλεσμα επεξεργασίας στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

5.2.3. Δεδομένα από Ελληνική Στατιστική Υπηρεσία

Πυκνότητα πληθυσμού: Για τον υπολογισμό του εκτεθειμένου πληθυσμού αξιοποιήθηκαν τα απογραφικά στοιχεία 2011 που παρέχει ελεύθερα η Ελληνική Στατιστική Υπηρεσία. Συγκεκριμένα χρησιμοποιήθηκαν οι πληροφορίες πληθυσμού και έκτασης της (ΕΛΣΤΑΤ, 2011) και στη συνέχεια επεξεργάζονται προκειμένου να ομαδοποιηθούν σε επίπεδο περιφερειακών ενοτήτων (βλέπε Πίνακας 5.10)

Πίνακας 5.10: Υπολογισμένη πυκνότητα πληθυσμού ανά περιφερειακή ενότητα (πηγή: (ΕΛΣΤΑΤ, 2011)

"Απογραφή πληθυσμού 2011. Μόνιμος πληθυσμός, αστικότητα, ορεινότητα, έκταση"						
Κωδικός (NUTS1+ NUTS2+ 10ψη φιος)	Περιγραφή	Μόνιμος	Αστικότητα (1=Αστικά, 2=Αγροτικά)	Ορεινότητα (Π=Πεδινό, Η=Ημιορεινό, Ο=Ορεινό)	Έκταση (τχ)*	πυκνότητα πληθυσμού
11207	ΠΕΡΙΦΕΡΕΙΑΚΗ ΕΝΟΤΗΤΑ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ	1.110.551			3.680,984	301,699491
11208	ΠΕΡΙΦΕΡΕΙΑΚΗ ΕΝΟΤΗΤΑ ΗΜΑΘΙΑΣ	140.611			1.702,470	82,5923511
11211	ΠΕΡΙΦΕΡΕΙΑΚΗ ΕΝΟΤΗΤΑ ΠΙΕΡΙΑΣ	126.698			1.524,467	83,1097033
23122	ΠΕΡΙΦΕΡΕΙΑΚΗ ΕΝΟΤΗΤΑ ΛΑΡΙΣΑΣ	284.325			5.387,178	52,7780964
23227	ΠΕΡΙΦΕΡΕΙΑΚΗ ΕΝΟΤΗΤΑ ΦΘΙΩΤΙΔΑΣ	158.231			4.442,440	35,6180387
23228	ΠΕΡΙΦΕΡΕΙΑΚΗ ΕΝΟΤΗΤΑ ΒΟΙΩΤΙΑΣ	117.920			2.954,297	39,9147411
35145	ΠΕΡΙΦΕΡΕΙΑΚΗ ΕΝΟΤΗΤΑ ΚΕΝΤΡΙΚΟΥ ΤΟΜΕΑ ΑΘΗΝΩΝ	1.029.520			88,064	11690,5887
35146	ΠΕΡΙΦΕΡΕΙΑΚΗ ΕΝΟΤΗΤΑ ΒΟΡΕΙΟΥ ΤΟΜΕΑ ΑΘΗΝΩΝ	592.490			133,857	4426,29074
35147	ΠΕΡΙΦΕΡΕΙΑΚΗ ΕΝΟΤΗΤΑ ΔΥΤΙΚΟΥ ΤΟΜΕΑ ΑΘΗΝΩΝ	489.675			67,725	7230,3433
35148	ΠΕΡΙΦΕΡΕΙΑΚΗ ΕΝΟΤΗΤΑ ΝΟΤΙΟΥ ΤΟΜΕΑ ΑΘΗΝΩΝ	529.826			70,165	7551,14373
35149	ΠΕΡΙΦΕΡΕΙΑΚΗ ΕΝΟΤΗΤΑ ΑΝΑΤΟΛΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ	502.348			1.517,351	331,06908
35150	ΠΕΡΙΦΕΡΕΙΑΚΗ ΕΝΟΤΗΤΑ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ	160.927			1.002,357	160,548587
35151	ΠΕΡΙΦΕΡΕΙΑΚΗ ΕΝΟΤΗΤΑ ΠΕΙΡΑΙΩΣ	448.997			51,296	8753,06067

5.3 Επίλυση Προβλήματος

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζεται ο υπολογισμός της αναμενόμενης επικινδυνότητας κατά τη μεταφορά χλωρίου στο σιδηροδρομικό δρομολόγιο ΕΣΣ Ικονίου- ΕΣΣ Διαλογής μέσω της αμαξοστοιχίας ΕΑτ, σύμφωνα με τις παραδοχές και τα δεδομένα που έχουν περιγραφεί στις ενότητες 5.1 και 5.2.

5.3.1. Υπολογισμός επί μέρους παραμέτρων

- Υπολογισμός δείκτη ατυχημάτων AR_i :** Λαμβάνοντας υπόψη την παραδοχή 2 της παραγράφου 5.1.1, ο δείκτης ατυχημάτων AR_i είναι κοινός για κάθε τμήμα l και υπολογίζεται λαμβάνοντας υπόψη τα ιστορικά δεδομένα ατυχημάτων της παραγράφου 5.2.1 ως εξής: (i) υπολογίζονται τα διανυθέντα χιλιόμετρα ανά έτος, (ii) στη συνέχεια υπολογίζεται ο δείκτης ατυχημάτων πεδίου ανά έτος ως το πηλίκο των εκτροχιασμών ανά έτος προς τα διανυθέντα χιλιόμετρα ανά έτος (iii) τελικά υπολογίζεται ο μέσος δείκτης ατυχημάτων πεδίου AR ως ο μέσος όρος των ετήσιων δεικτών ατυχημάτων των πέντε ετών. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στους Πίνακες 5.11, Πίνακας 5.12

Πίνακας 5.11: Υπολογισμός διανυθέντων χιλιομέτρων 2015-2019

code	ΑΠΟΣΤΑΣΗ	2015		2016		2017		2018		2019	
ΔΡΟΜΟΛΟΓΙΟ	(Km)	ΔΡΟΜΟΛΟΓΙΑ	ΔΙΑΝΥΘΕΝΤΑ ΧΙΛΙΟΜΕΤΡΑ	ΔΡΟΜΟΛΟΓΙΑ	ΔΙΑΝΥΘΕΝΤΑ ΧΙΛΙΟΜΕΤΡΑ	ΔΡΟΜΟΛΟΓΙΑ	ΔΙΑΝΥΘΕΝΤΑ ΧΙΛΙΟΜΕΤΡΑ	ΔΡΟΜΟΛΟΓΙΑ	ΔΙΑΝΥΘΕΝΤΑ ΧΙΛΙΟΜΕΤΡΑ	ΔΡΟΜΟΛΟΓΙΑ	ΔΙΑΝΥΘΕΝΤΑ ΧΙΛΙΟΜΕΤΡΑ
[1]	528	116	61.248,00	106	55.968,00	159	83.952,00	183	96.624,00	183	96.624,00
[2]	75	462	34.650,00	422	31.650,00	636	47.700,00	730	54.750,00	1460	109.500,00
[3]	552	231	127.512,00	211	116.472,00	318	175.536,00	365	201.480,00	730	402.960,00
[4]	528	15	7.920,00	24	12.672,00	138	72.864,00	150	79.200,00	183	96.624,00
[5]	75	60	4.500,00	96	7.200,00	550	41.250,00	600	45.000,00	1460	109.500,00
[6]	552	30	16.560,00	48	26.496,00	275	151.800,00	300	165.600,00	730	402.960,00
ΣΥΝΟΛΟ			252.390,00		250.458,00		573.102,00		642.654,00		1.218.168,00

Πίνακας 5.12: Υπολογισμός δείκτη ατυχημάτων πεδίου 2015-2019

ΕΤΟΣ	ΕΚΤΡΟΧΙΑΣΜΟΙ ΣΤΟ ΠΕΔΙΟ (εκτροχιασμοί)	ΔΙΑΝΥΘΕΝΤΑ ΧΙΛΙΟΜΕΤΡΑ (Km) [από 5.2]	ΕΤΗΣΙΟΣ ΔΕΙΚΤΗΣ ΑΤΥΧΗΜΑΤΩΝ ΠΕΔΙΟΥ (εκτροχ / km)	ΜΕΣΟΣ ΔΕΙΚΤΗΣ ΑΤΥΧΗΜΑΤΩΝ ΠΕΔΙΟΥ (εκτροχ / km)
2015	5	252.390,00	1,98106E-05	1,11465E-05
2016	5	250.458,00	1,99634E-05	
2017	6	573.102,00	1,04693E-05	
2018	3	642.654,00	4,66814E-06	
2019	1	1.218.168,00	8,20905E-07	

- 2. Υπολογισμός πιθανότητας ατυχήματος ΕΑ_Τ με εκτροχιασμό βαγονιού ΗΑΖΜΑΤ και διαρροή του, P(A_ε):** Η P(A_ε) για κάθε τμήμα ℓ υπολογίζεται σύμφωνα με την εξίσωση (3) του πίνακα Πίνακας 5.2, ενώ η P(A) για το σύνολο της διαδρομής σύμφωνα με την εξίσωση (4). Όπως παρουσιάζεται στην παραδοχή 3 της ενότητας 5.1.2 και στον πίνακα 5.6 οι εξαρτημένες πιθανότητες εκτροχιασμού και διαρροής βαγονιού ΗΑΖΜΑΤ για την 4^η υποδεκάδα της αμαξοστοιχίας (i =4) παίρνουν τις παρακάτω τιμές, ενώ ο δείκτης ατυχημάτων, όπως υπολογίστηκε παραπάνω 5.3.1,1. Τελικά η πιθανότητα P(A) ατυχήματος της ΕΑ_Τ με εκτροχιασμό βαγονιού ΗΑΖΜΑΤ και διαρροή του για το δρομολόγιο υπολογίζεται στον Πίνακα 5.13.

Πίνακας 5.13: Υπολογισμός πιθανότητας P(A) δρομολογίου της ΕΑ_Τ

AR	Μήκος δρομολογίου	P(D ₄ A _ε)	P(H D ₄ , A _ε)	P(R H, D ₄ , A _ε)	P(A)
(πίνακας 5.12)	L	(πίνακας 5.6)	(πίνακας 5.6)	(πίνακας 5.6)	εξίσωση (4) πίνακας 5.2
1,11465E-05	552,000	0,0908	0,076	0,0112	4,75548E-07

3. Υπολογισμός ρυθμού διαρροής χλωρίου: Σε συνέχεια της παραδοχής 6 της υποενότητας 5.1.1 και 7 της 5.1.2, παρακάτω παρουσιάζονται αναλυτικά τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων που επιλύθηκαν μέσω του λογισμικού ALOHA, για διαφορετικές διαμέτρους οπών από 1in έως 20 in και για επίπεδο D ατμοσφαιρικής αστάθειας. Σημειώνεται ότι το λογισμικό ALOHA θεωρεί ότι το υγροποιημένο χλώριο διαρρέει σε δύο φάσεις ροής ως μείγμα αερίου και αεροζόλ.

Από τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων διαπιστώνεται ότι:

- Η μικρή διάμετρος οπής συνεπάγεται μικρότερο ρυθμό διαρροής, μεγαλύτερο χρόνο εκκένωσης του βυτίου και μικρότερη απειλούμενη ζώνη. Ειδικά στην περίπτωση οπής 1in, παρατηρείται ότι ο χρόνος εκκένωσης ξεπερνά την μια ώρα. Σημειώνεται ότι το λογισμικό ALOHA δίνει ακριβή αποτελέσματα για την πρώτη ώρα διαρροής. Στην περίπτωση που η διαρροή ξεπερνά την μία ώρα δεν δίνει ακριβές αποτέλεσμα αλλά εμφανίζει την ένδειξη «>1hr».
- Παρατηρείται ότι για οπή διαμέτρου 5in ο χρόνος εκκένωσης του βυτίου είναι 5in, ενώ η απειλούμενη ζώνη έχει ήδη φτάσει τη μέγιστη τιμή της και παύει πια να αυξάνεται, παρότι ο ρυθμός διαρροής συνεχίζει να αυξάνεται.
- Δεδομένου ότι τα αποτελέσματα των απειλούμενων ζωνών παραμένουν σταθερά για οπές μεγαλύτερες των 5in, τελικά για την επίλυση του παρόντος προβλήματος λαμβάνουμε οπή 5in σε κάθε βυτιοφόρο βαγόνι, το οποίο αντιστοιχεί σε ρυθμό διαρροής κάθε οπής 16.300,00 Kg/ min και πλήρη εκκένωση των βυτίων εντός 5min.

Πίνακας 5.14: Αποτελέσματα 1^{ης} Αναφοράς ALOHA (όμοιος με 5.1)

Διάμετρος Ρωγμής	Ρυθμός Διαρροής	Χρόνος Αδεύματος	Απειλούμενη Ζώνη	Απελευθερωμένη Ποσότητα
(in)	(Kg/min)	(min)	km	kg
1	658,00	> 1h	2,2	38.671,00
2	2.620,00	33	5	81.647,00
3	5.890,00	15	6	81.647,00
4	10.500,00	8	6,1	81.647,00
5	16.300,00	5	6,2	81.647,00
6	23.400,00	4	6,2	81.647,00
(in)	(Kg/sec)	(min)	km	kg
20	1.360,00	1	6,2	81.647,00

1^η Αναφορά ALOHA: Προσομοιώσεις διαρροής βυτίου χλωρίου για διαφορετικές διαμέτρους οπής, τάξη αστάθειας D.

SITE DATA:

Location: ATHENS, GREECE

Building Air Exchanges Per Hour: 0.59 (unsheltered single storied)

Time: January 31, 2020 2000 hours ST (user specified)

CHEMICAL DATA:

Chemical Name: CHLORINE

CAS Number: 7782-50-5

Molecular Weight: 70.91 g/mol

AEGL-1 (60 min): 0.5 ppm AEGL-2 (60 min): 2 ppm AEGL-3 (60 min): 20 ppm

IDLH: 10 ppm

Ambient Boiling Point: -34.2° C

Vapor Pressure at Ambient Temperature: greater than 1 atm

Ambient Saturation Concentration: 1,000,000 ppm or 100.0%

ATMOSPHERIC DATA: (MANUAL INPUT OF DATA)

Wind: 2.5 meters/second from s at 10 meters

Ground Roughness: urban or forest Cloud Cover: 10 tenths

Air Temperature: 10° C

Stability Class: D

No Inversion Height

Relative Humidity: 65%

SOURCE STRENGTH:

Leak from hole in horizontal cylindrical tank

Non-flammable chemical is escaping from tank

Tank Diameter: 2.60 meters

Tank Length: 10.8 meters

Tank Volume: 57.3 cubic meters

Tank contains liquid

Internal Temperature: 10° C

Chemical Mass in Tank: 90 tons

Tank is 99% full

Note: The chemical escaped as a mixture of gas and aerosol (two phase flow).

THREAT ZONE: (GAUSSIAN SELECTED)

Model Run: Gaussian

4. Όγκος διαρρέοντος χλωρίου: Σε συνέχεια της παραδοχής 7 της υποενότητας 5.1.1, θεωρούμε ότι η συνολική μάζα του φορτίου που μεταφέρεται από τα δύο βυτιοφόρα βαγόνια ίση με 180 tn, θα διαρρεύσει. Η ποσότητα αυτή αντιστοιχεί σε διαρροή 163.293Kg υγροποιημένου χλωρίου, όπως το ALOHA υπολογίζει. (βλέπε αποτελέσματα απειλούμενων ζωνών)

5. Καθορισμός τάξης ατμοσφαιρικής αστάθειας: Σε συνέχεια της παραδοχής 6 της υποενότητας 5.1.2, επιλέγεται να εξεταστούν διαφορετικές

συνθήκες ατμοσφαιρικής αστάθειας στην περίπτωση του δρομολογίου που μελετάται προκειμένου να προσδιοριστούν αφενός οι επιδράσεις των μεταβολών αυτών στο τελικό αποτέλεσμα, αφετέρου να προσδιοριστεί το βέλτιστο επίπεδο ατμοσφαιρικής αστάθειας που τελικά αρμόζει να συμπεριληφθεί στην επίλυση του προβλήματος μας.

- ο Παράγοντες ατμοσφαιρικών συνθηκών που λαμβάνει υπόψη το Γκαουσσσιανό μοντέλο διασποράς και το λογισμικό ALOHA:

Σχετικά με τις τάξεις ατμοσφαιρικής αστάθειας το ALOHA στο ηλεκτρονικό εγχειρίδιο λειτουργίας του σημειώνει ότι «[...] η τάξη σταθερότητας έχει μεγάλη επίδραση στην πρόβλεψη του ALOHA για το μέγεθος της απειλούμενης ζώνης. Κάτω από ασταθείς συνθήκες, ένα αέριο διασποράς αναμειγνύεται γρήγορα με τον αέρα γύρω από αυτό. Το ALOHA αναμένει ότι το ρυπογόνο σύννεφο δεν θα επεκταθεί τόσο κάτω όσο στην περίπτωση πιο σταθερών συνθηκών, επειδή ο ρύπος θα αραιωθεί σύντομα κάτω από το Επίπεδο Ανησυχίας (LOC) και το ALOHA θα εμφανίσει μια μικρότερη ζώνη απειλής από ό, τι για πιο σταθερές συνθήκες[...]»

Οι τάξεις ατμοσφαιρικής αστάθειας (ή σταθερότητας) ταξινομούνται ως:

- Τάξη ατμοσφαιρικής σταθερότητας A: Πολύ ασταθής
- Τάξη ατμοσφαιρικής σταθερότητας B: Ασταθής
- Τάξη ατμοσφαιρικής σταθερότητας C: Ελαφρώς ασταθής
- Τάξη ατμοσφαιρικής σταθερότητας D: Ουδέτερη
- Τάξη ατμοσφαιρικής σταθερότητας E: Ελαφρώς Σταθερή
- Τάξη ατμοσφαιρικής σταθερότητας F: Σταθερή

Οι παράγοντες που επηρεάζουν και διαμορφώνουν την τάξη της ατμοσφαιρικής αστάθειας στο Γκαουσσσιανό μοντέλο διασποράς και κατά επέκταση λαμβάνονται υπόψη από το λογισμικό ALOHA είναι: (βλέπε και Πίνακας 5.5)

- Η ταχύτητα του ανέμου: Σύμφωνα με τους (Pasquill & Smith, 1983) η μικρότερη ταχύτητα ανέμου οδηγεί στο μέγιστο επίπεδο τοξικής συγκέντρωσης για κάθε τάξη ατμοσφαιρικής αστάθειας. Για τον λόγο αυτό στις προσομοιώσεις που επιλύθηκαν, επιλέχθηκε για κάθε ατμοσφαιρική τάξη ή μικρότερη δυνατή ταχύτητα ανέμου (τιμές από 1m/sec - έως 3m/sec). Παρόλα αυτά σε σπάνιες περιπτώσεις οι υψηλές ταχύτητες σχετίζονται με επίπεδο ατμοσφαιρικής αστάθειας F.

- Η νέφωση: το ποσοστό του ουρανού που καλύπτεται από σύννεφα επηρεάζει την ποσότητα της ηλιακής ακτινοβολίας που διέρχεται, γεγονός που επηρεάζει σημαντικά τον ρυθμό εξάτμισης της ουσίας. Συγκεκριμένα η θερμότητα από τον ήλιο επιταχύνει την εξάτμιση.
- Η θερμοκρασία περιβάλλοντος: Η θερμοκρασία επηρεάζει την εκτίμηση του ρυθμού εξάτμισης της ουσίας που διαρρέει. Συγκεκριμένα όσο υψηλότερη είναι η θερμοκρασία του αέρα, τόσο περισσότερο θερμαίνεται η διαρρέουσα ουσία και τόσο πιο γρήγορα εξατμίζεται. Το λογισμικό ALOHA επεξεργάζεται και άλλες φυσικές διεργασίες που εμπλέκονται σε μια χημική απελευθέρωση και επηρεάζονται από τη θερμοκρασία.
- Η υγρασία της ατμόσφαιρας: Η υγρασία της ατμόσφαιρας επηρεάζει την ατμοσφαιρική διαπερατότητα, τον ρυθμό εξάτμισης της διαρρέουσας ουσίας, καθώς και τους υπολογισμούς της διασποράς βαρέων αερίων. Ειδικά για την περίπτωση των βαρέων αερίων στην οποία ανήκει και το υγροποιημένο χλώριο που διαρρέει, το λογισμικό ALOHA ενσωματώνει πρόσθετους υπολογισμούς διασποράς που χρησιμοποιούν το μοντέλο DEGADIS (Spicer and Havens, 1989) και αφορούν την αρχική βαρυτική κατάρπτωση του νέφους.
- Τραχύτητα εδάφους: Η ύπαρξη ή μη εμποδίων όπως κτιρίων ή πυκνών δέντρων-θάμνων (δασώδης περιοχή) επηρεάζει την κίνηση του νέφους δεδομένου ότι η μεγαλύτερη τραχύτητα εδάφους έχει ως αποτέλεσμα μεγαλύτερη ατμοσφαιρική αναταραχή.
- Η ώρα της διαρροής: Στην περίπτωση διαρροής κατά τη διάρκεια νύχτας το λογισμικό ALOHA λαμβάνει υπόψη του την μειωμένη ηλιακή ακτινοβολία και ότι η ατμόσφαιρα θεωρείται πιο σταθερή (λιγότερο τυρβώδης) και ο άνεμος πιο αδύναμος.

ο Προσομοιώσεις διαφορετικών τάξεων ατμοσφαιρικής αστάθειας:

Αμέσως παρακάτω παρουσιάζονται έξη προσομοιώσεις σεναρίων διαρροής ενός βυτιοφόρου βαγονιού χλωρίου. Κάθε σενάριο αντιπροσωπεύει διαφορετική κατηγορία ατμοσφαιρικής αστάθειας όπως αυτή «υπολογίζεται» από το ALOHA ανάλογα με τις ατμοσφαιρικές συνθήκες (ταχύτητας ανέμου, υγρασίας, νέφωσης, θερμοκρασίας, ώρας) και περιβαλλοντικές (τραχύτητα εδάφους, θέση) που ο χρήστης εισάγει.

2^η Αναφορά ALOHA: Προσομοιώσεις διαρροής χλωρίου 90th από ρωγμή 5in, υπό διαφορετική ατμοσφαιρική αστάθεια

SITE DATA:

Location: ATHENS, GREECE

Building Air Exchanges Per Hour: 0.58 (unsheltered single storied)

CHEMICAL DATA:

Chemical Name: CHLORINE

CAS Number: 7782-50-5

Molecular Weight: 70.91 g/mol

AEGL-1 (60 min): 0.5 ppm AEGL-2 (60 min): 2 ppm AEGL-3 (60 min): 20 ppm

IDLH: 10 ppm

Ambient Boiling Point: -34.2° C

Vapor Pressure at Ambient Temperature: greater than 1 atm

Ambient Saturation Concentration: 1,000,000 ppm or 100.0%

SOURCE STRENGTH:

Leak from hole in horizontal cylindrical tank

Non-flammable chemical is escaping from tank

Tank Diameter: 2.60 meters

Tank Length: 10.8 meters

Tank Volume: 57.3 cubic meters

Tank contains liquid

Internal Temperature: 10° C

Chemical Mass in Tank: 90 tons

Tank is 99% full

Circular Opening Diameter: 5 inches

Opening is 0 meters from tank bottom

Release Duration: 5 minutes

Max Average Sustained Release Rate: 16,300 kilograms/min

(averaged over a minute or more)

Total Amount Released: 81,647 kilograms

Note: The chemical escaped as a mixture of gas and aerosol (two phase flow).

Πίνακας 5.15: Αποτελέσματα 2^{ης} Αναφοράς ALOHA

Σενάριο	Παράμετροι που εισάγονται από χρήστη			Αποτέλεσμα ALOHA	
	Ταχύτητα Ανέμου	Ηλιοφάνεια	Μέρα/Νυχτα	Κατηγορία Αστάθειας	Απειλούμενη Ζώνη
	(m/sec)	(tenth)			km
1 ^ο	1	0	M	A	2,6
2 ^ο	2	0	M	B	2,8
3 ^ο	2,5	5	M	C	4,1
4 ^ο	2,5	10	N	D	6,2
5 ^ο	3,5	5	N	E	>10
6 ^ο	3	0	N	F	>10

Από τα αποτελέσματα των παραπάνω προσομοιώσεων διαπιστώνεται ότι:

- Η τάξη της ατμοσφαιρικής αστάθειας επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό το μέγεθος της απειλούμενης ζώνης, καθώς για σταθερές συνθήκες τοποθεσίας και ώρας ατυχήματος, ποσότητας και κλάσης ουσίας που διαρρέει, τύπου βυτίου, μεγέθους και θέσης οπής και ρυθμού διαρροής, η μεταβολή της ατμοσφαιρικής τάξης επιφέρει πολύ μεγάλες μεταβολές στην υπολογιζόμενη απειλούμενη ζώνη από 2,6km έως >10km.
- Οι πιο ασταθείς ατμοσφαιρικές συνθήκες (τάξεις A,B,C) δυσχεραίνουν την διασπορά αεροσωματιδίων χλωρίου με αποτέλεσμα τον υπολογισμό μικρότερων απειλούμενων ζωνών. Αντιθέτως η ουδέτερη D και οι πιο σταθερές ατμοσφαιρικές συνθήκες E ,F διευκολύνουν την διασπορά χλωρίου σε μακρύτερες αποστάσεις απειλώντας περισσότερο πληθυσμό και φυσικό περιβάλλον.
- Η εξέλιξη της διασποράς αερίου κατά τη διάρκεια της νύχτας, δηλαδή απουσία ηλιακής ακτινοβολίας επιφέρει σχετικά σταθερές ατμοσφαιρικές συνθήκες (δυνατότητα επιλογής μεταξύ ατμοσφαιρικής τάξης D, E, F) γεγονός που συνεπάγεται σχετικά μεγαλύτερες απειλούμενες ζώνες σε σχέση με αντίστοιχες πρωινές ατμοσφαιρικές συνθήκες.
- Στην περίπτωση πολύ μικρής ταχύτητας ανέμου (από 1 έως 2,5m/sec) η διασπορά αεροσωματιδίων σε μικρότερη έκταση (μικρές απειλούμενες ζώνες) επιτυγχάνεται παρουσία έντονης ηλιακής ακτινοβολίας (πρωινές ώρες και ηλιοφάνεια)
- Επίσης για πολύ μικρή ταχύτητα ανέμου (από 1 έως 2,5m/sec) η αραιή ή πυκνή νέφωση μεταβάλλει την ατμοσφαιρική τάξη από σχετικά ασταθή (τάξη B) σε πιο σταθερή (τάξη C) ενώ ταυτόχρονα η αλλαγή μόνο της ώρας από πρωινή σε νυχτερινή την μεταβάλλει περαιτέρω σε τάξη D.
- Για τη δεδομένη περίπτωση μελέτης και για ατμοσφαιρικές τάξεις E, F όπου η υπολογιζόμενη απειλούμενη ζώνη ξεπερνά τα 10km, το λογισμικό ALOHA δεν δίνει ακριβή αποτελέσματα.

ο Προσομοιώσεις διαφορετικών ταχυτήτων ανέμου:

Αμέσως παρακάτω παρουσιάζονται προσομοιώσεις σεναρίων διαρροής ενός βυτιοφόρου βαγονιού χλωρίου για διαφορετικές ταχύτητες ανέμου με τους παρακάτω συνδυασμούς: (i) 9 σενάρια νυχτερινού ατυχήματος, για ταχύτητες νότιου ανέμου 2,5m/sec, 5m/sec και 6,5m/sec και για τα τρία επίπεδα ηλιοφάνειας/ νέφωσης (0, 5 και 10 tenths). (ii) 12 σενάρια πρωινού ατυχήματος, για ταχύτητες νότιου ανέμου 2,5m/sec, 4,5m/sec, 5,5m/sec και 6,5m/sec και για τα τρία επίπεδα ηλιοφάνειας/ νέφωσης (0, 5 και 10 tenths).

3^η Αναφορά ALOHA: Προσομοιώσεις διαρροής χλωρίου 90tn υπό διαφορετικές ταχύτητες ανέμου, νυχτερινό δρομολόγιο:

(i) NYXTA

SITE DATA:

Location: ATHENS, GREECE

Building Air Exchanges Per Hour: 0.43 (unsheltered single storied)

Time: January 31, 2020 2000 hours ST (user specified)

CHEMICAL DATA:

Chemical Name: CHLORINE

CAS Number: 7782-50-5

Molecular Weight: 70.91 g/mol

AEGL-1 (60 min): 0.5 ppm AEGL-2 (60 min): 2 ppm AEGL-3 (60 min): 20 ppm

IDLH: 10 ppm

Ambient Boiling Point: -34.2° C

Vapor Pressure at Ambient Temperature: greater than 1 atm

Ambient Saturation Concentration: 1,000,000 ppm or 100.0%

ATMOSPHERIC DATA: (MANUAL INPUT OF DATA)

Ground Roughness: urban or forest

Air Temperature: 10° C

No Inversion Height

Relative Humidity: 65%

SOURCE STRENGTH:

Leak from hole in horizontal cylindrical tank

Non-flammable chemical is escaping from tank

Tank Diameter: 2.60 meters

Tank Length: 10.8 meters

Tank Volume: 57.3 cubic meters

Tank contains liquid

Internal Temperature: 10° C

Chemical Mass in Tank: 90 tons

Tank is 99% full

Circular Opening Diameter: 5 inches

Opening is 0 meters from tank bottom

Release Duration: 5 minutes

Max Average Sustained Release Rate: 16,300 kilograms/min

(averaged over a minute or more)

Total Amount Released: 81,647 kilograms

Note: The chemical escaped as a mixture of gas and aerosol (two phase flow).

Πίνακας 5.16: Αποτελέσματα 3^{ης} Αναφοράς ΑΛΟΗΑ

Σενάριο	Παράμετροι που εισάγονται από χρήστη			Αποτέλεσμα ΑΛΟΗΑ	
	Ταχύτητα Ανέμου	Ηλιοφάνεια	Μέρα/Νυχτα	Κατηγορία Αστάθειας	Απειλούμενη Ζώνη
	(m/sec)	(tenth)			km
7 ^ο	2,5	0	N	F	>10
8 ^ο	5	0	N	E	>10
9 ^ο	6,5	0	N	D	6
10 ^ο	2,5	5	N	F	>10
11 ^ο	5	5	N	E	>10
12 ^ο	6,5	5	N	D	6
13 ^ο	2,5	10	N	D	6,2
14 ^ο	5	10	N	D	6,1
15 ^ο	6,5	10	N	D	6

Πίνακας 5.17: Αποτελέσματα 4^{ης} Αναφοράς ΑΛΟΗΑ

Σενάριο	Παράμετροι που εισάγονται από χρήστη			Αποτέλεσμα ΑΛΟΗΑ	
	Ταχύτητα Ανέμου	Ηλιοφάνεια	Μέρα/Νυχτα	Κατηγορία Αστάθειας	Απειλούμενη Ζώνη
	(m/sec)	(tenth)			km
16 ^ο	2,5	0	M	C	4.1
17 ^ο	4,5	0	M	C	4
18 ^ο	5,5	0	M	D	6,1
19 ^ο	6,5	0	M	D	6
20 ^ο	2,5	5	M	C	4,1
21 ^ο	4,5	5	M	C	4
22 ^ο	5,5	5	M	D	6,1
23 ^ο	6,5	5	M	D	6
24 ^ο	2,5	10	M	D	6,2
25 ^ο	5	10	M	D	6,1
26 ^ο	5,5	10	M	D	6,1
27 ^ο	6,5	10	M	D	6

4^η Αναφορά ALOHA: Προσομοιώσεις διαρροής χλωρίου 90tn υπό διαφορετικές ταχύτητες ανέμου, πρωινό δρομολόγιο

(ii) HMEPA
SITE DATA:
Location: ATHENS, GREECE
Building Air Exchanges Per Hour: 0.43 (unsheltered single storied)
SITE DATA:
Location: ATHENS, GREECE
Building Air Exchanges Per Hour: 0.43 (unsheltered single storied)
Time: January 31, 2020 2000 hours ST (user specified)

CHEMICAL DATA:
Chemical Name: CHLORINE
CAS Number: 7782-50-5 Molecular Weight: 70.91 g/mol
AEGL-1 (60 min): 0.5 ppm AEGL-2 (60 min): 2 ppm AEGL-3 (60 min): 20 ppm
IDLH: 10 ppm
Ambient Boiling Point: -34.2° C
Vapor Pressure at Ambient Temperature: greater than 1 atm
Ambient Saturation Concentration: 1,000,000 ppm or 100.0%

ATMOSPHERIC DATA: (MANUAL INPUT OF DATA)

Ground Roughness: urban or forest
Air Temperature: 10° C
No Inversion Height Relative Humidity: 65%

SOURCE STRENGTH:
Leak from hole in horizontal cylindrical tank
Non-flammable chemical is escaping from tank
Tank Diameter: 2.60 meters Tank Length: 10.8 meters
Tank Volume: 57.3 cubic meters
Tank contains liquid Internal Temperature: 10° C
Chemical Mass in Tank: 90 tons Tank is 99% full
Circular Opening Diameter: 5 inches
Opening is 0 meters from tank bottom
Release Duration: 5 minutes
Max Average Sustained Release Rate: 16,300 kilograms/min
(averaged over a minute or more)
Total Amount Released: 81,647 kilograms
Note: The chemical escaped as a mixture of gas and aerosol (two phase flow).

Από τα αποτελέσματα των παραπάνω επιλύσεων διαπιστώνεται ότι:

- Στην περίπτωση του νυχτερινού δρομολογίου και για σταθερό επίπεδο νέφωσης όσο αυξάνεται η ταχύτητα του ανέμου, μειώνεται η απειλούμενη ζώνη. Αυτό παρατηρείται και για τα τρία επίπεδα νέφωσης.

- Στην περίπτωση του πρωινού δρομολογίου, και για σταθερό επίπεδο νέφωσης και ατμοσφαιρικής τάξης όσο αυξάνεται η ταχύτητα του ανέμου, μειώνεται η απειλούμενη ζώνη. Αυτό παρατηρείται και για τα τρία επίπεδα νέφωσης.
 - Στην περίπτωση του πρωινού δρομολογίου, όταν αυξάνεται η ταχύτητα του ανέμου από 4,5 σε 5,5 m/sec και για σταθερό επίπεδο ηλιοφάνειας 0 και 5 tenths η ατμοσφαιρική τάξη γίνεται πιο σταθερή από επίπεδο C σε D.
 - Στην περίπτωση του πρωινού δρομολογίου και της πυκνής νέφωσης (10tenths) η ατμοσφαιρική τάξη παραμένει σταθερή D, για όλες τις τιμές της ταχύτητας.
 - Οι απειλούμενες ζώνες που υπολογίζονται στην περίπτωση του νυχτερινού δρομολογίου είναι πάντα μεγαλύτερες για όλες τις ταχύτητες ανέμου και τις ατμοσφαιρικές τάξεις σε σχέση με τις αντίστοιχες στην περίπτωση πρωινού δρομολογίου.
- ο Επιλογή ατμοσφαιρικών παραμέτρων και ταχύτητας ανέμου για την περίπτωση μελέτης:

Δεδομένων των παραπάνω γενικότερων συμπερασμάτων που προέκυψαν από την ανάλυση των πολλαπλών επιλύσεων και αποσκοπώντας στην επιλογή παραμέτρων που αντιπροσωπεύουν την δυσμενέστερη και ταυτόχρονα εύλογη εκδοχή επιλέγονται τα δύο παρακάτω σενάρια τάξεων ατμοσφαιρικής αστάθειας:

- 1^ο σενάριο ατμοσφαιρικής αστάθειας D, που εκφράζει την περίπτωση νυχτερινού δρομολογίου με ταχύτητα νότιου ανέμου 2,5m/sec, θερμοκρασία περιβάλλοντος 10° C, υγρασία 65%, και πυκνής νέφωσης 10tenths, σε αστικό/ δασώδες περιβάλλον.
- 2^ο σενάριο ατμοσφαιρικής αστάθειας C, που εκφράζει την περίπτωση πρωινού δρομολογίου με ταχύτητα νότιου ανέμου 2,5m/sec, θερμοκρασία περιβάλλοντος 10° C, υγρασία 65%, και μέτριας νέφωσης 5tenths, σε αστικό/ δασώδες περιβάλλον.

6. Οριακή τιμή συγκέντρωσης αεροσωματιδίων χλωρίου: Σε συνέχεια της 8^{ης} παραδοχής της υποενότητας 5.1.2, η οριακή τιμή τοξικής συγκέντρωσης πάνω από την οποία υφίσταται κίνδυνος για την ανθρώπινη ζωή και υγεία λαμβάνεται ίση με 20ppm για 60min (επίπεδο AEGL-3, US EPA). Η τιμή αυτή ενσωματώνεται στην εξίσωση (7) για τον προσδιορισμό της απόστασης της

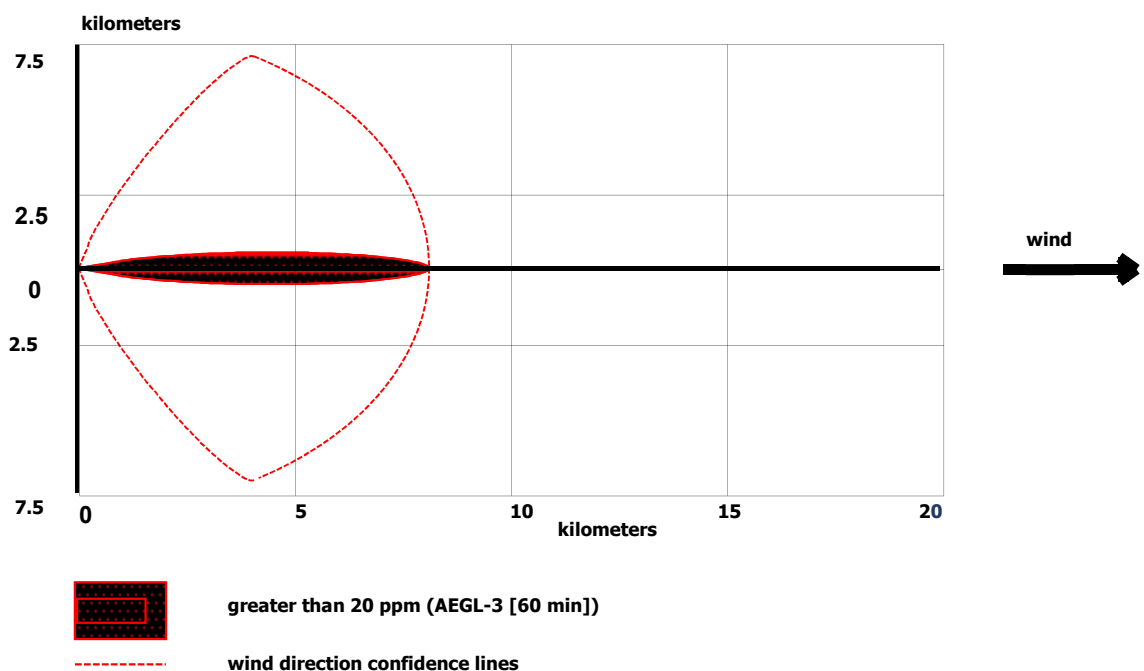
περιοχής επίδρασης του ατυχήματος. Αντιστοίχως χρησιμοποιείται στην επίλυση των σεναρίων μέσω του λογισμικού ALOHA.

5.3.2. Υπολογισμός απειλούμενης περιοχής μέσω ALOHA

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των επιλύσεων των δύο σεναρίων που προσομοιώθηκαν μέσω του λογισμικού ALOHA. Τα δύο σενάρια αναφέρονται στην εμπορευματική αμαξοστοιχία ΕΑτ της περίπτωσης μελέτης που μεταφέρει 180^{τη} υγροποιημένου χλωρίου μέσω βυτιοφόρων βαγονιών σε θερμοκρασία περιβάλλοντος.

1. Σενάριο 1^ο, περίπτωση νυχτερινού δρομολογίου:

Εικόνα 6: Απειλούμενη Ζώνη για 1^ο σενάριο (επίλυση ALOHA)



Δηλαδή μέγιστο μήκος περιοχής επίδρασης ατυχήματος 1^{ου} σεναρίου

$$X_1 = 8,1\text{Km.}$$

5^η Αναφορά ALOHA: Αποτελέσματα για ΕΑ_Τ 180tn χλωρίου σε D ατμοσφαιρική αστάθεια, νυχτερινό δρομολόγιο.

SITE DATA:

Location: ATHENS, GREECE
Building Air Exchanges Per Hour: 0.43 (unsheltered single storied)
Time: January 31, 2020 2000 hours ST (user specified)

CHEMICAL DATA:

Chemical Name: CHLORINE
CAS Number: 7782-50-5 Molecular Weight: 70.91 g/mol
AEGL-1 (60 min): 0.5 ppm AEGL-2 (60 min): 2 ppm AEGL-3 (60 min): 20 ppm
IDLH: 10 ppm
Ambient Boiling Point: -34.2° C
Vapor Pressure at Ambient Temperature: greater than 1 atm
Ambient Saturation Concentration: 1,000,000 ppm or 100.0%

ATMOSPHERIC DATA: (MANUAL INPUT OF DATA)

Wind: 2.5 meters/second from s at 10 meters
Ground Roughness: urban or forest Cloud Cover: 10 tenths
Air Temperature: 10° C Stability Class: D
No Inversion Height Relative Humidity: 65%

SOURCE STRENGTH:

Leak from hole in horizontal cylindrical tank
Non-flammable chemical is escaping from tank
Tank Diameter: 2.60 meters Tank Length: 21.6 meters
Tank Volume: 115 cubic meters
Tank contains liquid Internal Temperature: 10° C
Chemical Mass in Tank: 180 tons Tank is 99% full
Circular Opening Diameter: 10 inches
Opening is 0 meters from tank bottom
Model Run: traditional ALOHA tank
Release Duration: 3 minutes
Max Average Sustained Release Rate: 64,700 kilograms/min
(averaged over a minute or more)
Total Amount Released: 163,293 kilograms
Note: The chemical escaped as a mixture of gas and aerosol (two phase flow).

THREAT ZONE: (GAUSSIAN SELECTED)

Model Run: Gaussian
Red : 8.1 kilometers --- (20 ppm = AEGL-3 [60 min])

2. Σενάριο 2º, περίπτωση πρωινού δρομολογίου:

6^η Αναφορά ΑΛΟΗΑ: Αποτελέσματα για ΕΑ_Τ 180tn χλωρίου σε C ατμοσφαιρική αστάθεια, πρωινό δρομολόγιο

SITE DATA:

Location: ATHENS, GREECE
Building Air Exchanges Per Hour: 0.43 (unsheltered single storied)
Time: January 31, 2020 1558 hours ST (using computer's clock)

CHEMICAL DATA:

Chemical Name: CHLORINE
CAS Number: 7782-50-5 Molecular Weight: 70.91 g/mol
AEGL-1 (60 min): 0.5 ppm AEGL-2 (60 min): 2 ppm AEGL-3 (60 min): 20 ppm
IDLH: 10 ppm
Ambient Boiling Point: -34.2° C
Vapor Pressure at Ambient Temperature: greater than 1 atm
Ambient Saturation Concentration: 1,000,000 ppm or 100.0%

ATMOSPHERIC DATA: (MANUAL INPUT OF DATA)

Wind: 2.5 meters/second from s at 10 meters
Ground Roughness: urban or forest Cloud Cover: 5 tenths
Air Temperature: 10° C Stability Class: C
No Inversion Height Relative Humidity: 65%

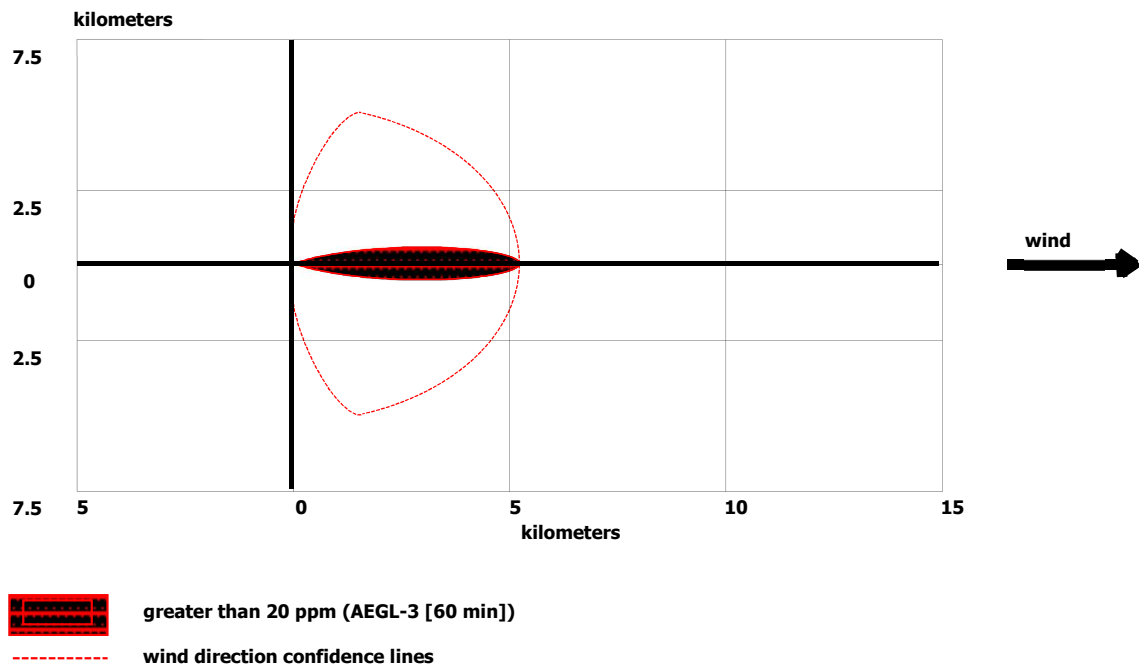
SOURCE STRENGTH:

Leak from hole in horizontal cylindrical tank
Non-flammable chemical is escaping from tank
Tank Diameter: 2.60 meters Tank Length: 21.6 meters
Tank Volume: 115 cubic meters
Tank contains liquid Internal Temperature: 10° C
Chemical Mass in Tank: 180 tons Tank is 99% full
Circular Opening Diameter: 10 inches
Opening is 0 meters from tank bottom
Release Duration: 3 minutes
Max Average Sustained Release Rate: 64,700 kilograms/min
(averaged over a minute or more)
Total Amount Released: 163,293 kilograms
Note: The chemical escaped as a mixture of gas and aerosol (two phase flow).

THREAT ZONE: (GAUSSIAN SELECTED)

Model Run: Gaussian
Red : 5.2 kilometers --- (20 ppm = AEGL-3 [60 min])

Εικόνα 7: Απειλούμενη ζώνη για 2^ο σενάριο (επίλυση ALOHA)



Δηλαδή μέγιστο μήκος περιοχής επίδρασης ατυχήματος 2^{ου} σεναρίου

$$X_2 = 5,2 \text{ Km.}$$

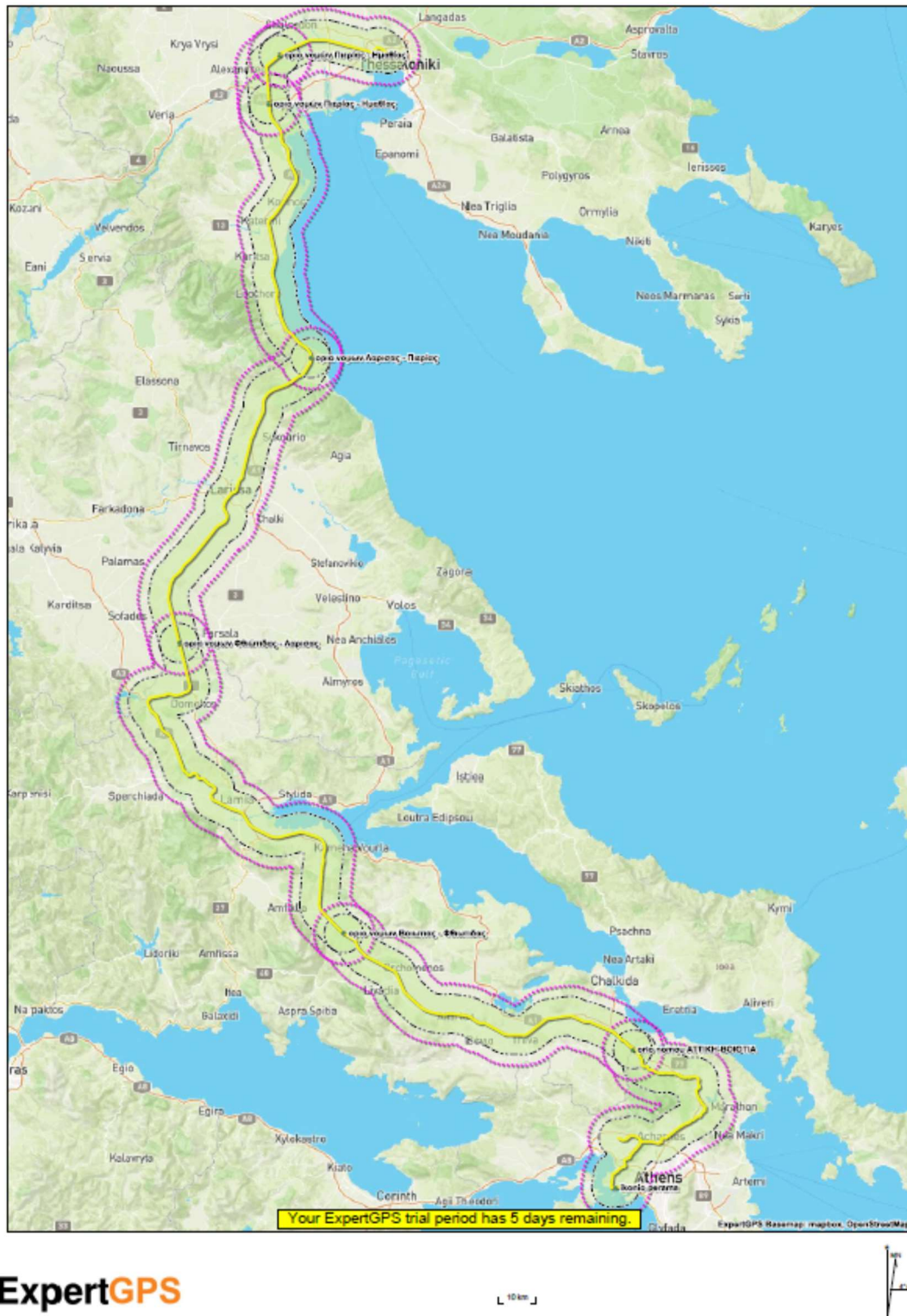
5.3.3. Καθορισμός ζώνης επιρροής ατυχήματος κατά μήκος δρομολογίου

Η κάτοψη του τμήματος του σιδηροδρομικού δικτύου που αποτελεί το δρομολόγιο της περίπτωσης μελέτης, σχεδιάστηκε μέσω του λογισμικού ExpertGPS προκειμένου να μπορεί να απεικονιστεί σε υπόβαθρο χάρτη του Ελλαδικού χώρου και να είναι δυνατή η περαιτέρω επεξεργασία του σχεδίου. Τα στοιχεία της χάραξης ανακτήθηκαν από την πλατφόρμα GEODATA, όπως αναλυτικά περιγράφεται στην υποενότητα 5.2.2.

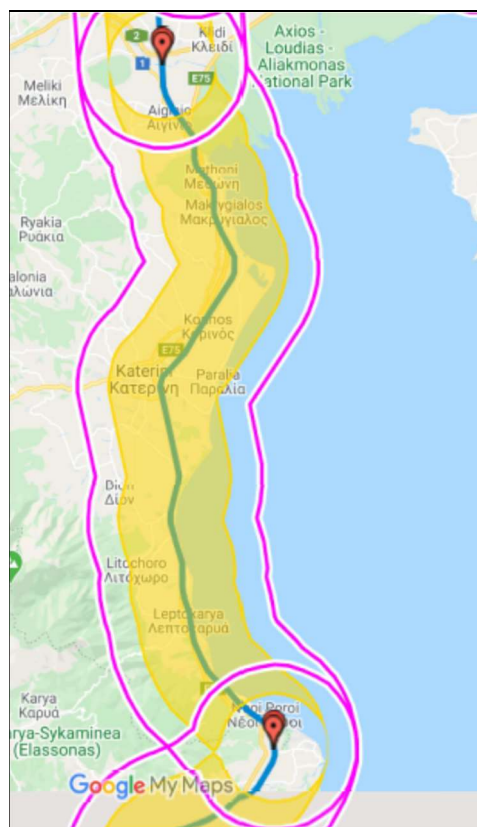
Η ζώνη επιρροής κάθε σεναρίου ατυχήματος προκύπτει εφαρμόζοντας το μέγιστο μήκος της περιοχής επίδρασης που υπολογίστηκε στην 5.3.2 για το αντίστοιχο σενάριο, ως ακτίνα της κατά μήκος διαδρομής δημιουργώντας δύο ζώνες εκατέρωθεν των δύο πλευρών της διαδρομής πλάτους ίσου με το υπολογιζόμενο αντίστοιχο μήκος. Συγκεκριμένα για το 1^ο σενάριο νυχτερινού δρομολογίου όπου σχεδιάζονται δύο ζώνες εκατέρωθεν της διαδρομής πλάτους $X_1=8,1\text{Km}$ όπως απεικονίζεται στην εικόνα 8 (μαύρη διακεκομμένη γραμμή). Αντίστοιχα για το 2^ο σενάριο πρωινού δρομολογίου σχεδιάζονται δύο ζώνες εκατέρωθεν της

διαδρομής πλάτους $X_2=5,2\text{Km}$ όπως απεικονίζεται στην εικόνα 8 (κίτρινη γραμμή) . Στην παρούσα περίπτωση μελέτης οι ζώνες επιρροές σχεδιάστηκαν μέσω του λογισμικού ExpertGPS ,που διαθέτει τη δυνατότητα σχεδιασμού buzzer zones.

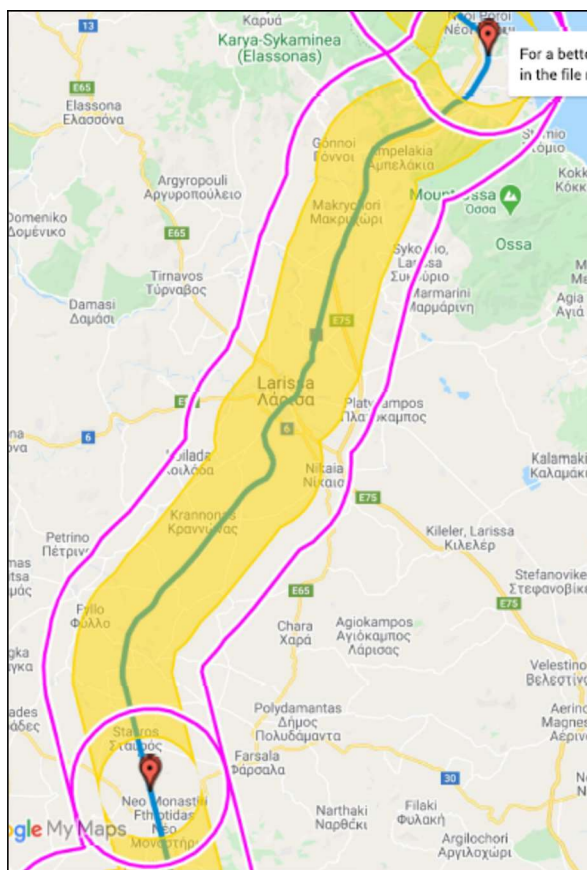
Εικόνα8: Απεικόνιση ζωνών επιρροής περίπτωσης μελέτης στο Expert GPS



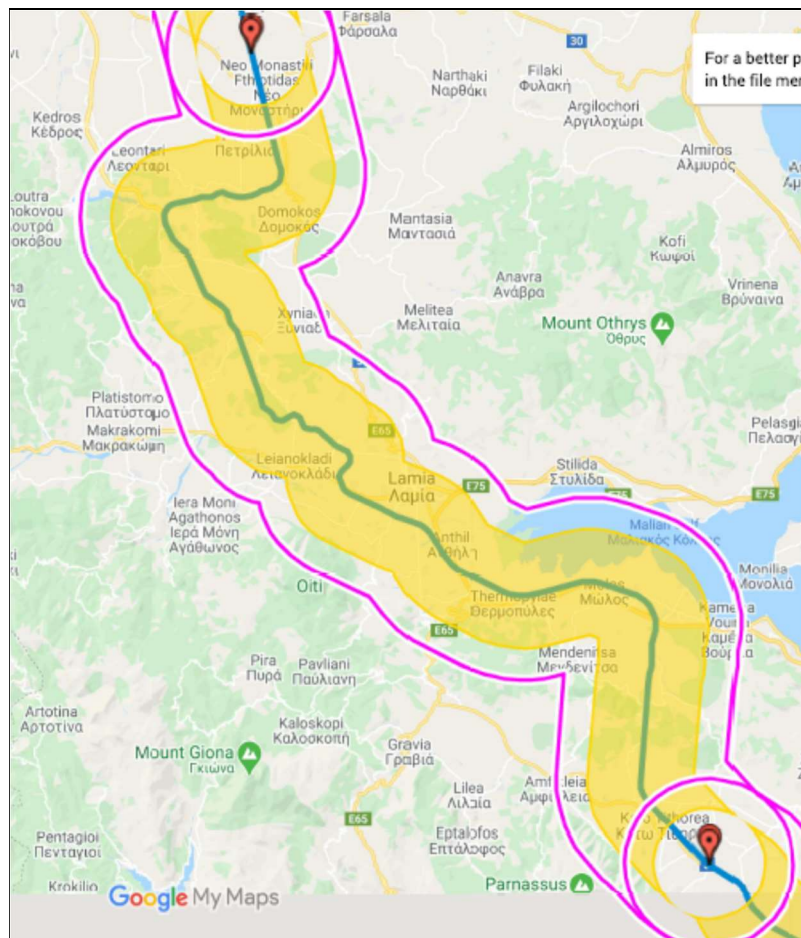
Εικόνα 11: Ζώνες επιρροής περιφερειακής ενότητας Πιερίας



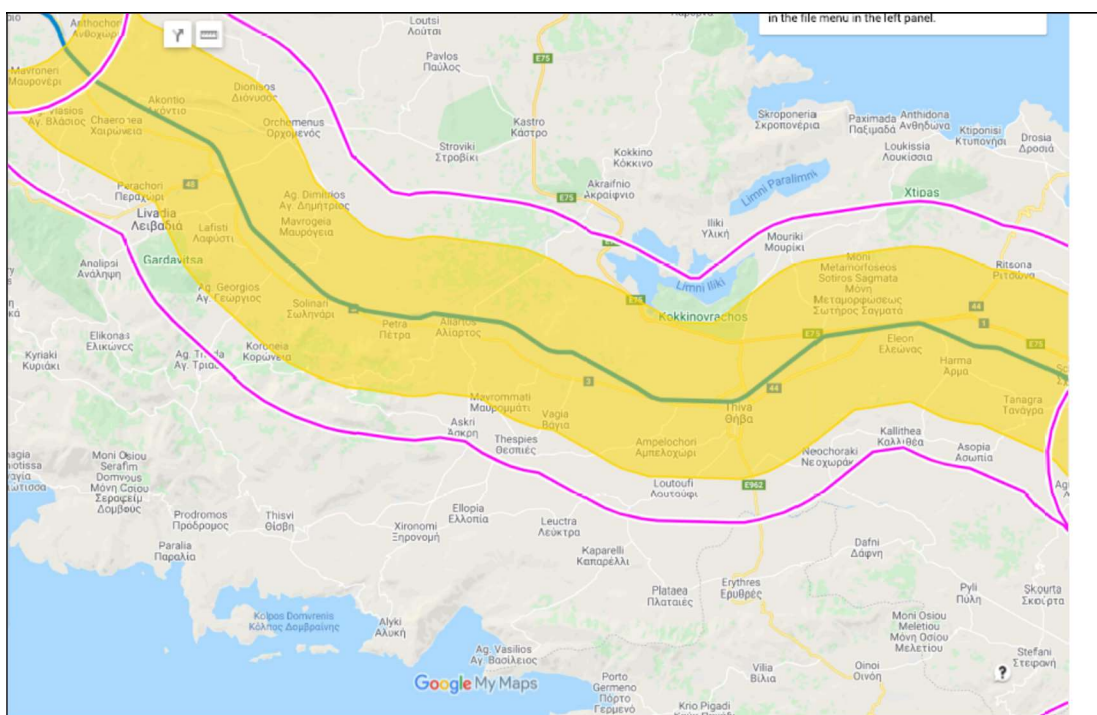
Εικόνα 12: Ζώνες επιρροής περιφερειακής ενότητας Λάρισας



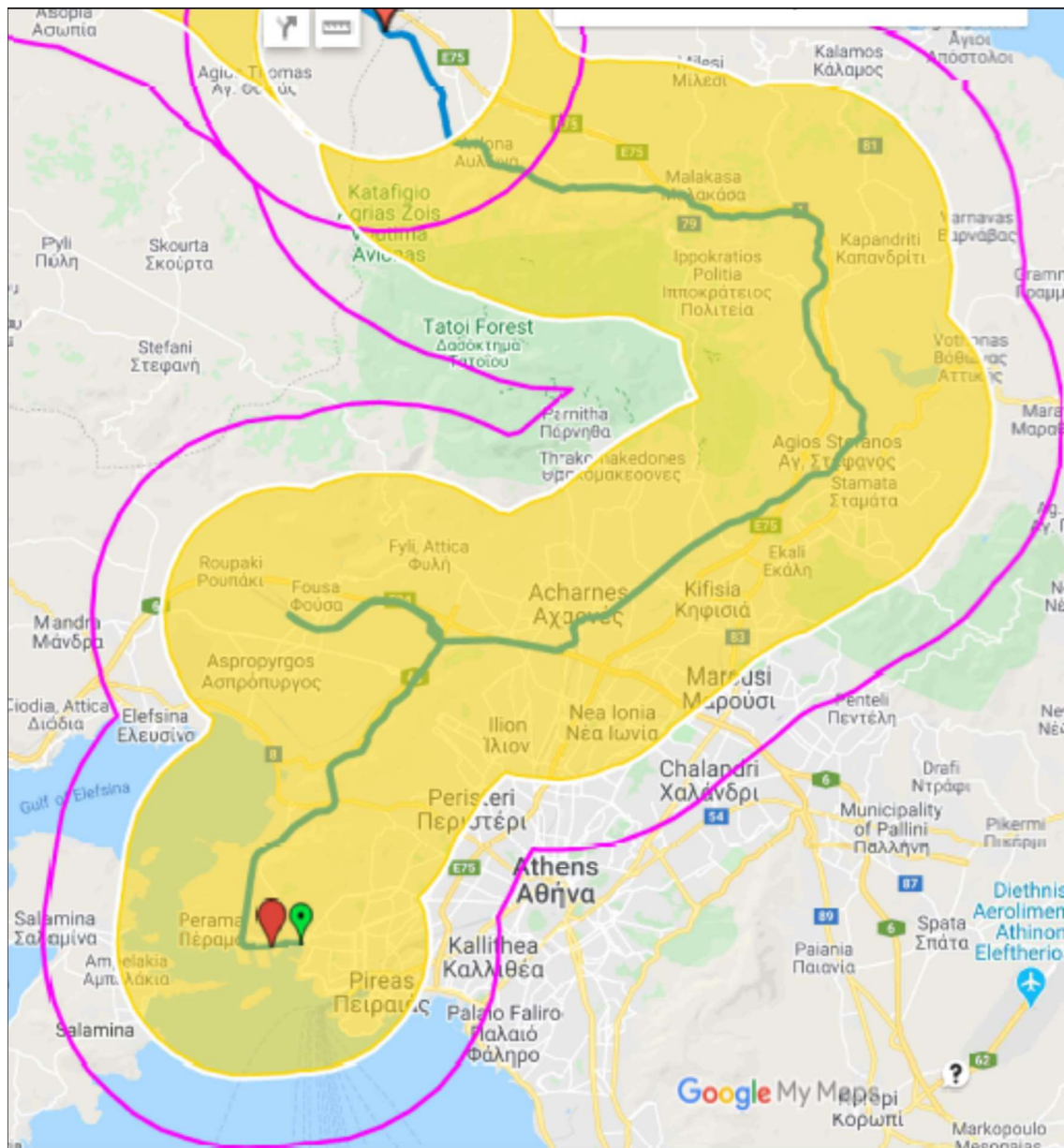
Εικόνα 13: Ζώνες επιρροής περιφερειακής ενότητας Φθιώτιδας



Εικόνα 14: Ζώνες επιρροής περιφερειακής ενότητας Βοιωτίας



Εικόνα 15: Ζώνες επιρροής Αττικής



5.3.4. Υπολογισμός εκτεθειμένου πληθυσμού

Για τον υπολογισμό του εκτεθειμένου πληθυσμού με ακρίβεια, είναι αναγκαία η πληροφορία της χωρικής κατανομής του πληθυσμού ως βάση δεδομένων σε σύστημα GIS προκειμένου να υπολογίζονται επακριβώς, στα όρια των ζωνών επιρροής, οι επιφάνειες των δήμων και δημοτικών κοινοτήτων που εμπεριέχονται και στη συνέχεια ο πληθυσμός που διαμένει και άρα κινδυνεύει. Η παραπάνω μορφή πληροφορίας δεν διατίθεται (ελεύθερα) από την Ελληνική Στατιστική

Υπηρεσία, αντιθέτως διατίθενται τα στοιχεία της απογραφής πληθυσμού 2011 ανά δημοτική κοινότητα (ή δήμο) και ανά περιφερειακή ενότητα (σε μορφή excel) καθώς και στοιχεία έκτασης σε Km².

Για τον ακριβέστερο υπολογισμό του πληθυσμού επιλέγεται η παρακάτω μεθοδολογία:

1^ο βήμα: γίνεται τμηματοποίηση της συνολικής διαδρομής ανά περιφερειακή ενότητα, και για κάθε τμήμα υπολογίζεται το μήκος της διαδρομής που την διανύει.

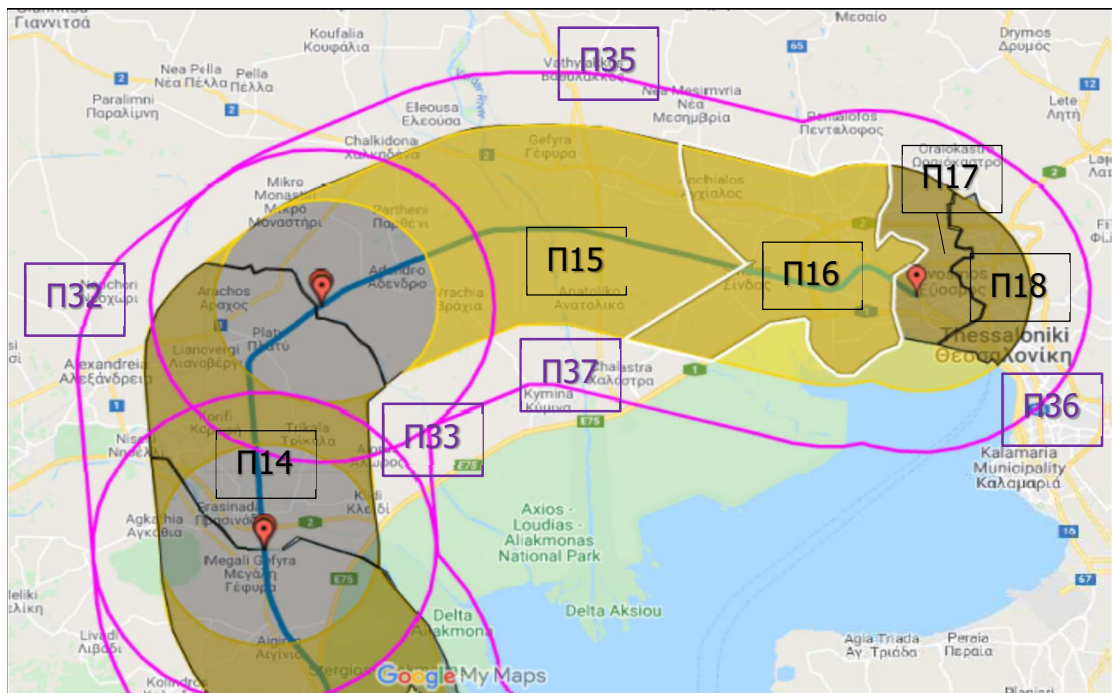
2^ο βήμα: Για κάθε σενάριο δρομολογίου εμβαδοποιούνται οι επιμέρους επιφάνειες των περιφερειακών ενότητων που συνθέτουν την ζώνης επιρροής. Βλέπε επιφάνειες από Π1 έως Π37 όπως αποτυπώνονται στις Εικόνα16, Εικόνα17, Εικόνα18, και Εικόνα 20.

3^ο βήμα: Από τα πληθυσμιακά δεδομένα της υποενότητας 5.2.3 υπολογίζεται η πυκνότητα πληθυσμού σε επίπεδο περιφερειακής ενότητας (βλέπε Πίνακας 5.10)

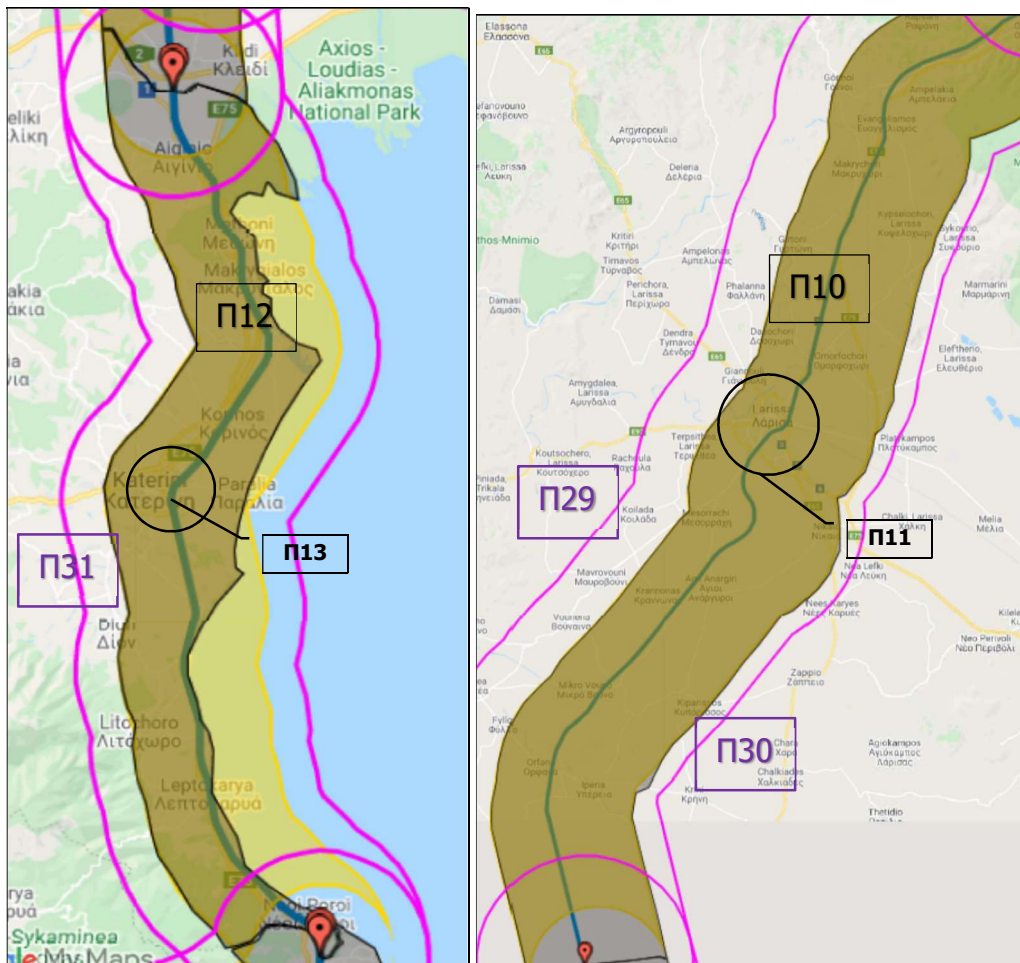
4^ο βήμα: Υπολογίζεται ο εκτεθειμένος πληθυσμός ανά περιφερειακή ενότητα, ως γινόμενο των επιφανειών Π1 έως Π37 με την αντίστοιχη πυκνότητα πληθυσμού, όπως παρουσιάζεται στον Πίνακας 5.19 και Πίνακας 5.19

Για την περίπτωση του νομού Αττικής, οι ζώνες επιρροής επεκτείνονται σε επτά περιφερειακές ενότητες (Πειραιώς, Ανατολική και Δυτική Αττική, Δυτικού Κεντρικού και Βόρειου τομέα Αθηνών και Νήσων). Επίσης για να ελαχιστοποιηθεί το σφάλμα για τις περιφερειακές ενότητες Βοιωτίας, Φθιώτιδας, Λάρισας και Πιερίας που το σιδηροδρομικό δίκτυο διέρχεται εντός των πρωτευουσών, ο εκτεθειμένος πληθυσμός των πρωτευουσών υπολογίζεται επακριβώς με βάση τον πληθυσμό των πόλεων και όχι με βάση την πυκνότητα πληθυσμού της περιφερειακής ενότητας. Τέλος η περιφερειακή ενότητα Θεσσαλονίκης χωρίστηκε σε τέσσερα τμήματα αποτελούμενα από τις επιφάνειες των (i)δήμου Θεσσαλονίκης και δημοτική ενότητα Σταυρουπόλεως (ii) δήμου Αμπελοκήπων και δήμου Ευόσμου (iii) δήμου Εχεδώρου (iv) υπολοίπου ΠΕ Θεσσαλονίκης. Ο εκτεθειμένος πληθυσμός υπολογίζεται σύμφωνα με τις αντίστοιχες πυκνότητες πληθυσμού. Τα αποτελέσματα ενσωματώνονται και απεικονίζονται στον Πίνακας 5.19. και Πίνακας 5.19

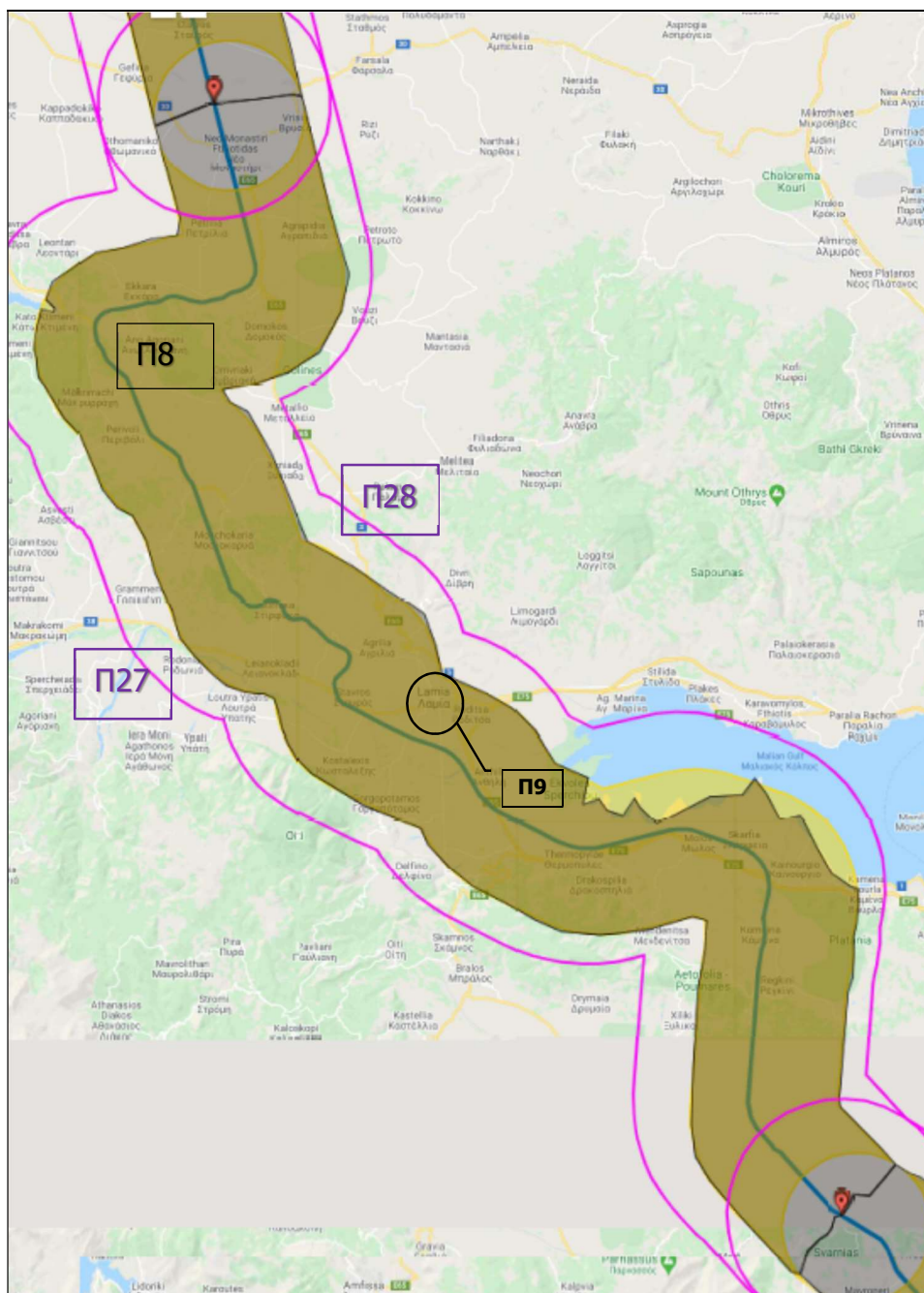
Εικόνα16: Εμβαδοποίηση ζωνών επιρροής στις ΠΕ Θεσσαλονίκης & Ημαθίας, για Χ₂



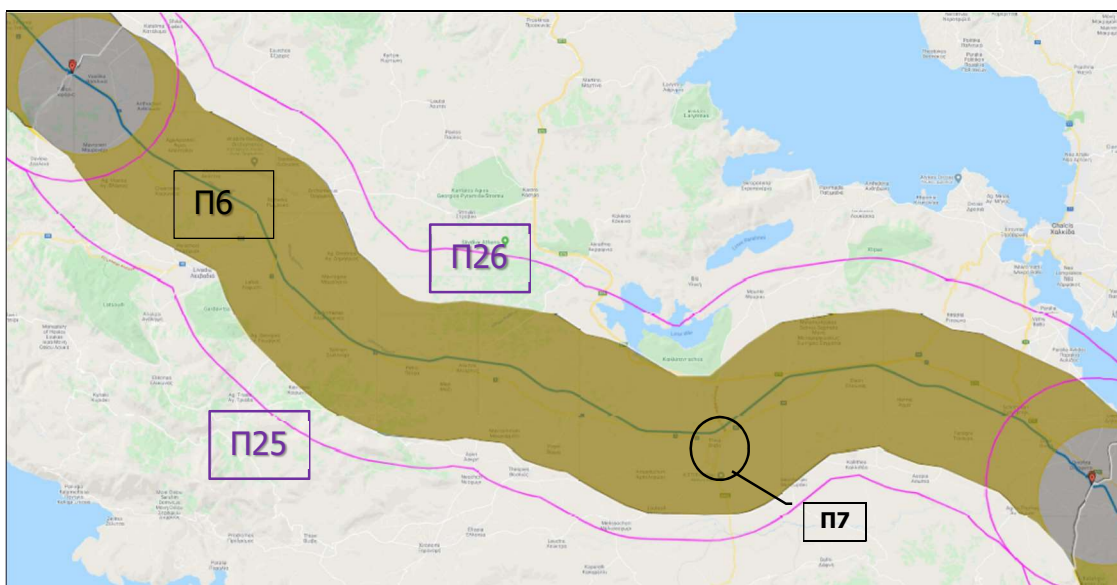
Εικόνα17: Εμβαδοποίηση ζώνης επιρροής ΠΕ Πιερίας, Λάρισας για Χ₂



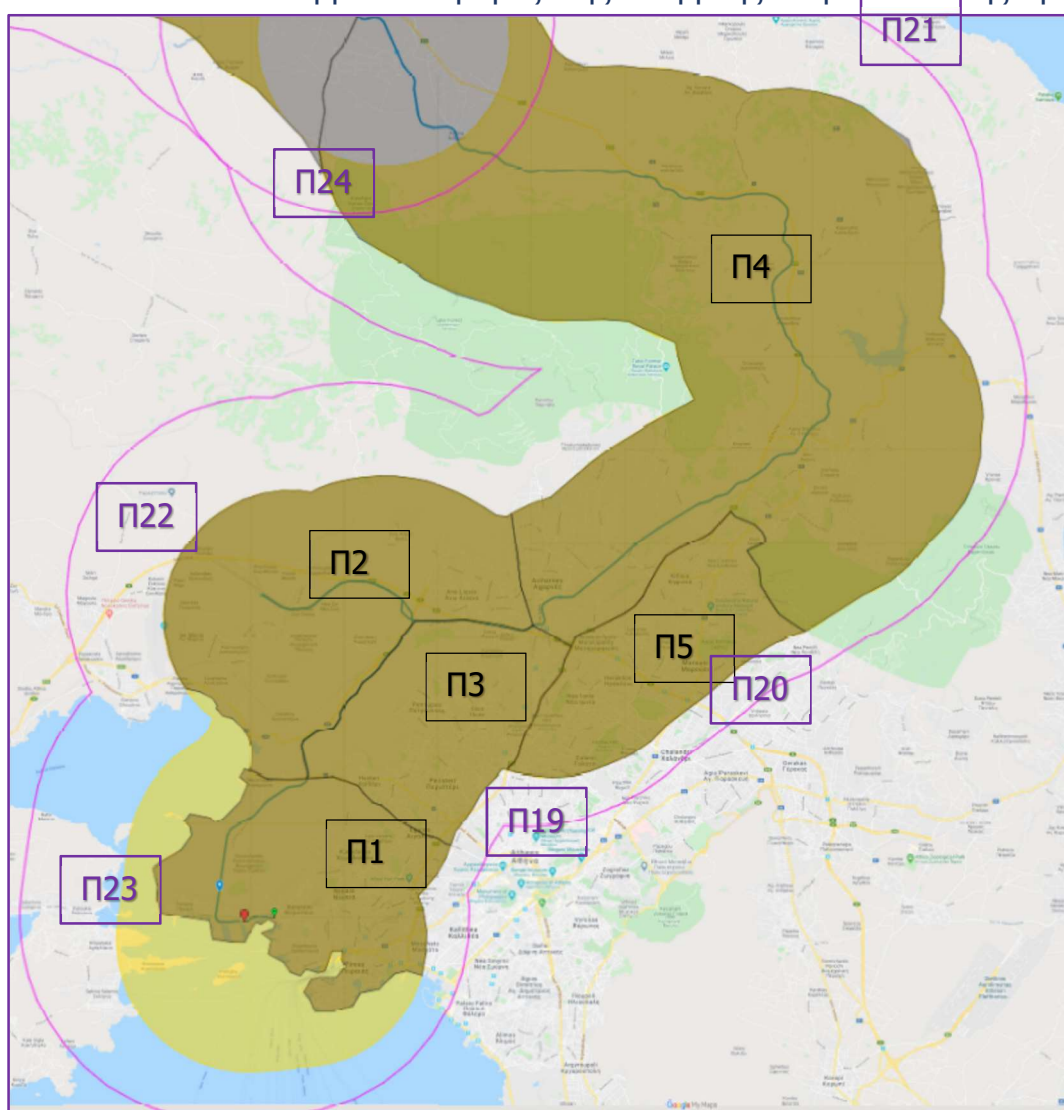
Εικόνα18: Εμβαδοποίηση ζώνης επιρροής ΠΕ Φθιώτιδας για Χ2



Εικόνα19: Εμβαδοποίηση ζώνης επιρροής ΠΕ Βοιωτία για Χ₂



Εικόνα 20: Εμβαδοποίηση ζώνης επιρροής νομού Αττικής για Χ₂



Πίνακας 5.18: Υπολογισμός εκτεθειμένου πληθυσμού στο 2^ο σενάριο πρωινού
δρομολογίου

Επικράνεια Π	Διερχόμενη περιφερειακή ή δημοτική ενότητα	Μήκος σιδηροδρομικής γραμμής εντός Επικρατειών Π Km	Εμβαδά επικρατειών Π (Km ²)	Πυκνότητα Πληθυσμού (άτομα/km ²)	Εκτεθειμένος πληθυσμός (Pe _i) ανά επικράνεια Π (άτομα)
Π1	Πειραιώς	93,854	72,500	8753,061	634.596,90
Π2	Δυτικής Αττικής		112,000	160,549	17.981,44
Π3	Δυτικού Τομέα Αθηνών		59,300	7230,343	428.759,36
Π4	Ανατολικής Αττικής		432,000	331,069	143.021,84
Π5	Βόρειου Τομέα Αθηνών		58,200	4426,291	257.610,12
Π6	Βοιωτίας	100,237	824,040	39,915	32.891,34
Π7	Θήβας		143,960	158,960	22.883,88
Π8	Φθιώτιδας	131,490	1144,360	35,618	40.759,86
Π9	Λαμίων		55,640	934,650	52.003,93
Π10	Λάρισας	98,132	834,760	52,778	44.057,04
Π11	Λαρισαίων		122,240	1201,947	146.926,00
Π12	Περίας	80,084	474,700	83,110	39.452,18
Π13	Κατερίνης		63,300	921,150	58.308,80
Π14	Ημαθίας	15,408	133,000	82,590	10.984,47
Π15	Υπόλοιπο Θεσσαλονίκης (Αδενδρο, Ανατολικό, Αγ. Αθανάσιος)	32,796	200,000	301,700	60.340,00
Π16	Δημοτική ενότητα Εχεδώρου (Σινδος-Καλοχώρι-Διάβατα)		48,600	284,260	13.815,04
Π17	Δήμος Αμπελοκήπων - Μενεμένης, Κορδελιό, Ευόσμου		27,500	7613,390	209.368,23
Π18	Δήμος Θεσσαλονίκης, Σταυρουπόλεως		22,200	16526,830	366.895,63
	ΣΥΝΟΛΟ	552,000	4828,300		2.580.656,04

Πίνακας 5.19: Υπολογισμός εκτεθειμένου πληθυσμού στο 1^ο σενάριο νυχτερινού
δρομολογίου

Διερχόμενη περιφερειακή ή δημοτική ενότητα	Μήκος σιδηροδρομικής γραμμής εντός Επικρατειών Π Km	Εμβαδά επικρατειών Π (Km ²)	Πυκνότητα Πληθυσμού (άτομα/km ²)	Εκτεθειμένος πληθυσμός (Pe) ανά επικράτεια Π (άτομα)
Πειραιώς	93,854	72,50	8.753,06	634.596,90
Νήσων		31,70	84,96	2.693,23
Δυτικής Αττικής		194,20	160,55	31.178,54
Δυτικού Τομέα Αθηνών		59,30	7.230,34	428.759,36
Ανατολικής Αττικής		636,80	331,07	210.824,79
Βόρειου Τομέα Αθηνών		74,10	4.426,29	327.988,14
Κεντρικού Τομέα Αθηνών		23,40	11.690,59	273.559,77
Βοιωτίας	100,237	1.316,04	39,91	52.529,40
Θήβας		143,96	158,96	22.883,88
Φθιώτιδας	131,490	1.670,36	35,62	59.494,95
Λαμίων		55,64	934,65	52.003,93
Λάρισας	98,132	1.346,76	52,78	71.079,43
Λαρισαίων		122,24	1.201,95	146.926,00
Περίας	80,084	640,70	83,11	53.248,39
Κατερίνης		63,30	921,15	58.308,80
Ημαθίας	15,408	187,50	82,59	15.485,63
Υπόλοιπο Θεσσαλονίκης (Αδενδρο, Ανατολικό, Αγ. Αθανάσιος)	32,796	310,80	301,70	93.768,36
Δημοτική ενότητα Εχέδωρου (Σινδος-Καλοχώρι-Διάβατα)		111,50	284,26	31.694,99
Δήμος Αμπελοκήπων - Μενεμένης, Κορδελιό, Ευόσμου		27,50	7.613,39	209.368,23
Δήμος Θεσσαλονίκης, Σταυρουπόλεως		33,70	16.526,83	556.954,17
ΣΥΝΟΛΟ	552,000	7.122,00		3.333.346,87

5.3.5. Υπολογισμός συνολικής επίπτωσης ατυχήματος C(A)

Η επίπτωση του πιθανού ατυχήματος υπολογίζεται από την εξίσωση (5) του Πίνακα 5.2 και ισούται με τον εκτεθειμένο πληθυσμό που υπολογίστηκε στην ενότητα 5.3.4. Συνοπτικά τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.20 και αφορούν στα δύο σενάρια, νυχτερινού και πρωινού δρομολογίου και σε κάθε μήκος l της διαδρομής.

Πίνακας 5.20: Υπολογισμός επιπτώσεων για νυχτερινό και πρωινό δρομολόγιο

Διερχόμενη περιφερειακή / Δημοτική Ενότητα	Επίπτωση C(A _e) ανά ΠΕ ή ΔΕ		Συνολική Επίπτωση C(A) = ΣC(A _e) για ένα δρομολόγιο	
	νυχτερινό δρομολόγιο	πρωινό δρομολόγιο	νυχτερινό δρομολόγιο	πρωινό δρομολόγιο
Πειραιώς	634.596,90	634.596,90		
Νήσων	2.693,23	0,00		
Δυτικής Αττικής	31.178,54	17.981,44		
Δυτικού Τομέα Αθηνών	428.759,36	428.759,36		
Ανατολικής Αττικής	210.824,79	143.021,84		
Βόρειου Τομέα Αθηνών	327.988,14	257.610,12		
Κεντρικού Τομέα Αθηνών	273.559,77	0,00		
Βοιωτίας	52.529,40	32.891,34		
Θήβας	22.883,88	22.883,88		
Φθιώτιδας	59.494,95	40.759,86		
Λαμίας	52.003,93	52.003,93		
Λάρισας	71.079,43	44.057,04		
Λαρισαίων	146.926,00	146.926,00		
Πιερίας	53.248,39	39.452,18		
Κατερίνης	58.308,80	58.308,80		
Ημαθίας	15.485,63	10.984,47		
Υπόλοιπο Θεσσαλονίκης (Αδενδρο, Ανατολικό, Αγ. Αθανάσιος)	93.768,36	60.340,00		
Δημοτική ενότητα Εχεδώρου (Σινδος-Καλοχώρι-Δάβατα)	31.694,99	13.815,04		
Δήμος Αμπελοκήπων - Μενεμένης, Κορδελιό, Ευόσμου	209.368,23	209.368,23		
Δήμος Θεσσαλονίκης, Σταυρουπόλεως	556.954,17	366.895,63		
			3.333.346,87	2.580.656,04

5.4 Αποτελέσματα επίλυσης

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της εφαρμογής του μοντέλου εκτίμησης επικινδυνότητας μεταφοράς επικίνδυνων φορτίων στο δρομολόγιο Ε.Σ.Σ Ικονίου –Ε.Σ.Σ Διαλογής που εκτελεί η εμπορευματική αμαξοστοιχία ΕΑ_Τ.

Συγκεκριμένα, η Επικινδυνότητα του δρομολογίου, σε όρους κοινωνικής διακινδύνευσης υπολογίζεται από την εξίσωση (2) του Πίνακα 5.2 και τις επιμέρους παραμέτρους, όπως έχουν ήδη υπολογιστεί στην ενότητα 5.3. Συνοπτικά τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.21 και αφορούν στα δύο σενάρια, νυχτερινού και πρωινού δρομολογίου.

Πίνακας 5.21: Αποτελέσματα Επικινδυνότητας, υπολογισμός Κοινωνικής Διακινδύνευσης

Σενάριο	Ζώνη Επιρροής (σε Km ²) (από πίνακες 5.18, 5.19)	Πιθανότητα ατυχήματος ΕΑ _Τ με εκτροχασμό βαγονιών ΕΦ και διαρροή τους HAZAMT P(A) (από πίνακα 5.13)	Επίπτωση C(A) = ΣC(A _e) (σε άτομα) (από πίνακα 5.20)	Κοινωνική Διακινδύνευση SR άτομα ανά δρομολόγιο εξίσωση (2) πίνακας 5.2	Διακινδύνευση για 100 δρομολόγια SR × 100 (άτομα)
Νυχτερινό δρομολόγιο	7.122,00	4,75548E-07	3.333.346,87	1,59	159
Πρωινό δρομολόγιο	4.828,30	4,75548E-07	2.580.656	1,23	123

Συμπερασματικά, η επικινδυνότητα της εμπορευματικής αμαξοστοιχίας ΕΑ_Τ που εκτελεί το δρομολόγιο Ε.Σ.Σ Ικόνιο-Ε.Σ.Σ Διαλογή μεταφέροντας υγροποιημένο χλώριο 180tn υπολογίστηκε σε όρους κοινωνικής διακινδύνευσης για ένα δρομολόγιο ίση με 1,59 για την περίπτωση νυχτερινού δρομολογίου και 1,23 άτομα για την περίπτωση πρωινού δρομολογίου.

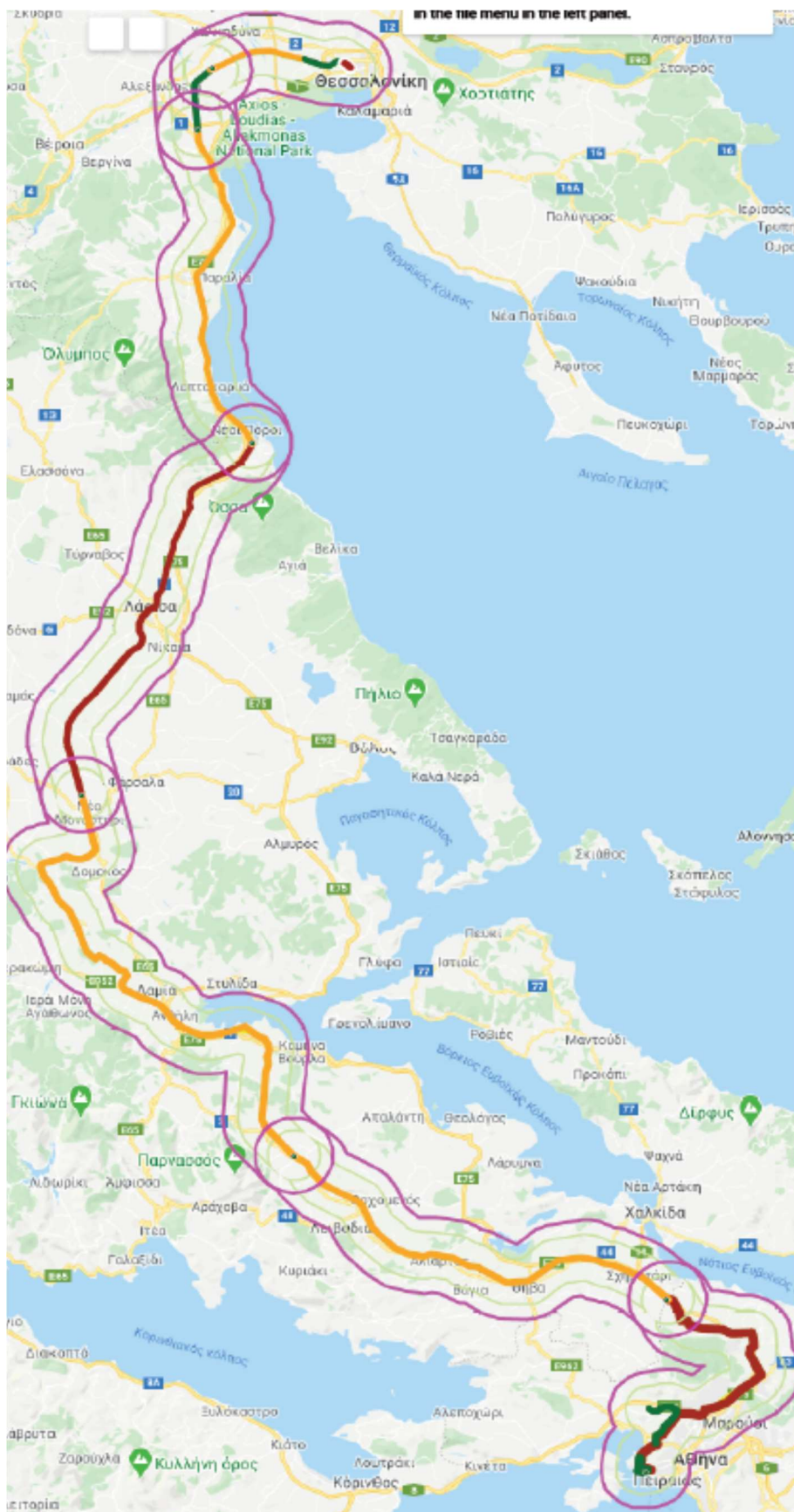
Στους πίνακα 5.22, Πίνακας 5.23 υπολογίζεται η κοινωνική διακινδύνευση ανά επιφάνεια περιφερειακής/δημοτικής ενότητας και ανά σενάριο. Σημειώνεται ότι με κόκκινη επισήμανση εμφανίζονται οι επιφάνειες των οποίων η SR ξεπερνά την τιμή $4,8 \times 10^{-2}$ η οποία αντιστοιχεί σε εκτεθειμένο πληθυσμό άνω των 100.000 ατόμων. Με πορτοκαλί επισήμανση εμφανίζονται οι επιφάνειες των οποίων η SR κυμαίνεται μεταξύ $2,38 \times 10^{-2}$ και $4,8 \times 10^{-2}$ οι οποίες αντιστοιχούν σε εκτεθειμένο πληθυσμό από 50.000 έως 100.000 άτομα και με πράσινη επισήμανση οι επιφάνειες των οποίων ο εκτεθειμένος πληθυσμός δεν ξεπερνά τις 50.000 άτομα. Τα αποτελέσματα απεικονίζονται γραφικά στις Εικόνα 21, Εικόνα 22.

Πίνακας 5.22: Κοινωνική διακινδύνευση ανά ΠΕ/ΔΕ , νυχτερινό δρομολόγιο

	Διερχόμενη περιφερειακή / Δημοτική Ενότητα	Επίπτωση C(A _e) ανά ΠΕ ή ΔΕ	Κοινωνική Διακινδύνευση SR × 10 ⁻² ανά ΠΕ ή ΔΕ
ΝΟΜΟΣ ΑΤΤΙΚΗΣ	ΠΕ Πειραιώς	634.596,90	30,18
	ΠΕ Νήσων	2.693,23	0,13
	ΠΕ Δυτικής Αττικής	31.178,54	1,48
	ΠΕ Δυτικού Τομέα Αθηνών	428.759,36	20,39
	ΠΕ Ανατολικής Αττικής	210.824,79	10,03
	ΠΕ Βόρειου Τομέα Αθηνών	327.988,14	15,60
	ΠΕ Κεντρικού Τομέα Αθηνών	273.559,77	13,01
ΝΟΜΟΣ ΒΟΙΩΤΙΑΣ	ΠΕ Βοιωτίας	52.529,40	2,50
	ΔΕ Θήβας	22.883,88	1,09
ΝΟΜΟΣ ΦΘΙΩΤΙΔΑΣ	ΠΕ Φθιώτιδας	59.494,95	2,83
	ΔΕ Λαμίων	52.003,93	2,47
ΝΟΜΟΣ ΛΑΡΙΣΑΣ	ΠΕ Λάρισας	71.079,43	3,38
	ΔΕ Λαρισαίων	146.926,00	6,99
ΝΟΜΟΣ ΠΙΕΡΙΑΣ	ΠΕ Πιερίας	53.248,39	2,53
	ΔΕ Κατερίνης	58.308,80	2,77
ΝΟΜΟΣ ΗΜΑΘΙΑΣ	ΠΕ Ημαθίας	15.485,63	0,74
ΝΟΜΟΣ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ	ΔΕ Υπόλοιπο Θεσσαλονίκης (Αδενδρο, Ανατολικό, Αγ. Αθανάσιος)	93.768,36	4,46
	Δημοτική ενότητα Εχεδώρου (Σινδος-Καλοχώρι-Διάβατα)	31.694,99	1,51
	Δήμος Αμπελοκήπων -Μενεμένης,		
	Κορδελιό, Ευόσμου	209.368,23	9,96
	Δήμος Θεσσαλονίκης, Σταυρουπόλεως		
		556.954,17	26,49

SR	PE
SR ≥ 4,8	PE ≥ 100.000
2,4 ≤ SR ≤ 4,8	50.000 ≤ PE < 100.000
0 < SR < 2,4	0 < PE < 50.000

Εικόνα 21: Γραφική αποτύπωση PE, SR ανά Περιφερειακή /Δημοτική Ενότητα, νυχτερινό δρομολόγιο

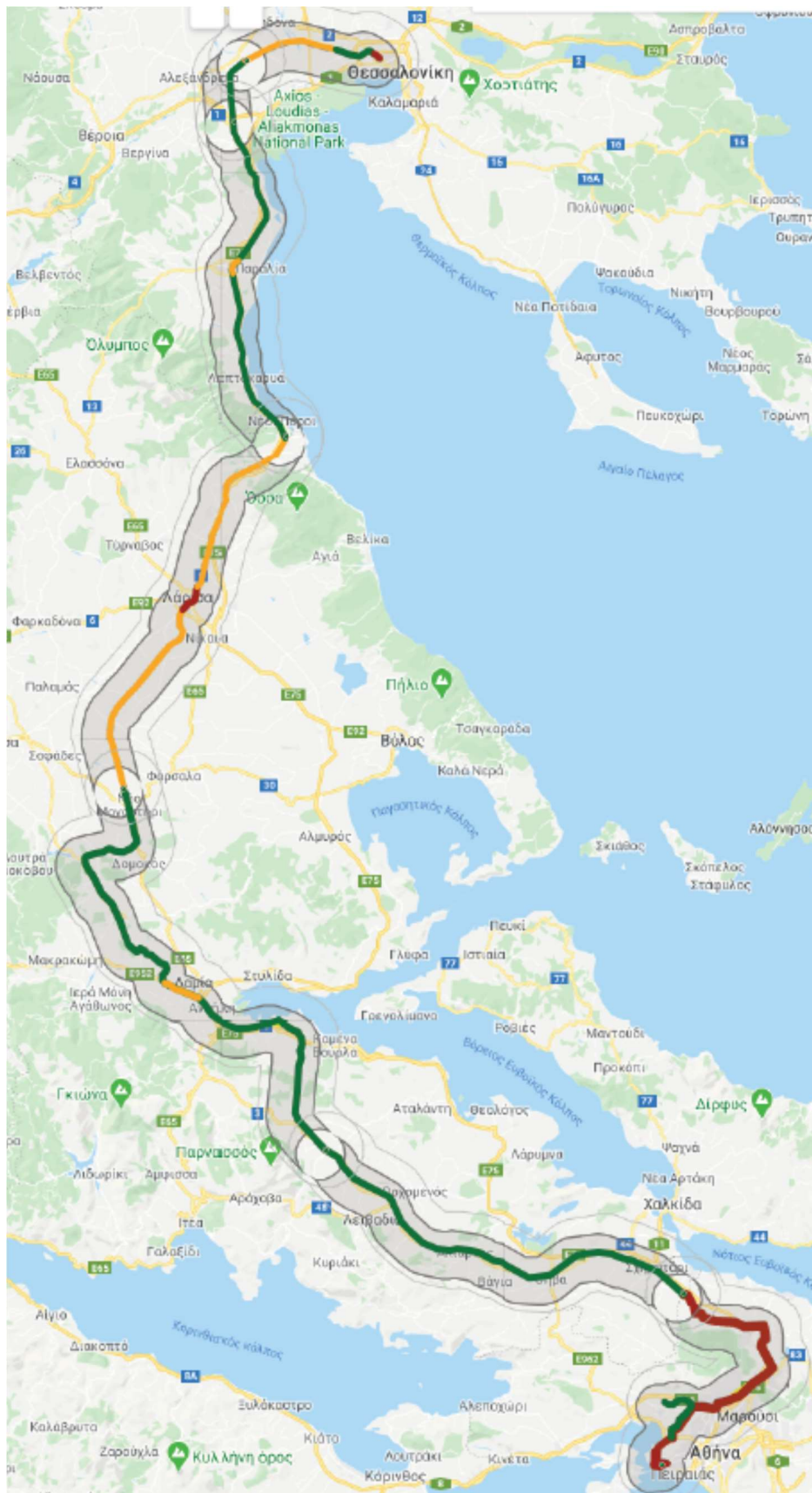


Πίνακας 5.23: Κοινωνική διακινδύνευση ανά ΠΕ/ΔΕ , πρωινό δρομολόγιο

	Διερχόμενη περιφερειακή / Δημοτική Ενότητα	Επίπτωση C(A _r) ανά ΠΕ ή ΔΕ	Κοινωνική Διακινδύνευση SR × 10 ⁻² ανά ΠΕ ή ΔΕ
ΝΟΜΟΣ ΑΤΤΙΚΗΣ	ΠΕ Πειραιώς	634.596,90	30,18
	ΠΕ Δυτικής Αττικής	17.981,44	0,86
	ΠΕ Δυτικού Τομέα Αθηνών	428.759,36	20,39
	ΠΕ Ανατολικής Αττικής	143.021,84	6,80
	ΠΕ Βόρειου Τομέα Αθηνών	257.610,12	12,25
ΝΟΜΟΣ ΒΟΙΩΤΙΑΣ	ΠΕ Βοιωτίας	32.891,34	1,56
	ΔΕ Θήβας	22.883,88	1,09
ΝΟΜΟΣ ΦΘΙΩΤΙΔΑΣ	ΠΕ Φθιώτιδας	40.759,86	1,94
	ΔΕ Λαμιέων	52.003,93	2,47
ΝΟΜΟΣ ΛΑΡΙΣΑΣ	ΠΕ Λάρισας	44.057,04	2,10
	ΔΕ Λαρισαίων	146.926,00	6,99
ΝΟΜΟΣ ΠΙΕΡΙΑΣ	ΠΕ Πιερίας	39.452,18	1,88
	ΔΕ Κατερίνης	58.308,80	2,77
ΝΟΜΟΣ ΗΜΑΘΙΑΣ	ΠΕ Ημαθίας	10.984,47	0,52
	ΔΕ Υπόλοιπο Θεσσαλονίκης (Αδενδρο, Ανατολικό, Αγ. Αθανάσιος)	60.340,00	2,87
ΝΟΜΟΣ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ	Δημοτική ενότητα Εχεδωρου (Σινδος- Καλοχώρι-Διάβατα)	13.815,04	0,66
	Δήμος Αμπελοκήπων -Μενεμένης, Κορδελιό, Ευόσμου	209.368,23	9,96
	Δήμος Θεσσαλονίκης, Σταυρουπόλεως	366.895,63	17,45

SR	PE
SR ≥ 4,8	PE ≥ 100.000
2,4 ≤ SR ≤ 4,8	50.000 ≤ PE < 100.000
0 < SR < 2,4	0 < PE < 50.000

Εικόνα 22 Γραφική αποτύπωση ΡΕ, SR ανά Περιφερειακή /Δημοτική Ενότητα, πρωινό δρομολόγιο



6. Συμπεράσματα & προτάσεις περαιτέρω έρευνας

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα γενικά συμπεράσματα της παρούσας διπλωματικής εργασίας, τα οποία τεκμηριώνονται από τα επιμέρους συμπεράσματα που περιέχονται σε κάθε ενότητα των προηγούμενων κεφαλαίων. Επιπλέον περιλαμβάνονται προτάσεις για περαιτέρω έρευνα στο γενικότερο αντικείμενο της επικινδυνότητας κατά την οδική, σιδηροδρομική και συνδυασμένη μεταφοράς επικίνδυνων φορτίων.

6.1 Συμπεράσματα μεθοδολογιών εκτίμησης επικινδυνότητας

Παρακάτω παρουσιάζονται τα γενικά συμπεράσματα που προέκυψαν από την ανασκόπηση των πρόσφατων ερευνητικών προτάσεων στον τομέα της επικινδυνότητας κατά την οδική, σιδηροδρομική και συνδυασμένη μεταφοράς επικίνδυνων φορτίων. Συγκεκριμένα:

- 1.** Στην πλειοψηφία τους οι έρευνες που παρουσιάζονται, συσχετίζουν την πιθανότητα σιδηροδρομικού ατυχήματος όπου διαρρέει επικίνδυνη ουσία, με τον εκτροχιασμό του βαγονιού που μεταφέρει HAZMAT. Αυτό συνεπάγεται ότι για να μειωθεί η πιθανότητα διαρροής του ΕΦ, αρκεί η λήψη ενεργειών προκειμένου να μειωθεί η πιθανότητα εκτροχιασμού των βαγονιών HAZMAT. Σε ότι αφορά στη πιθανότητα εκτροχιασμού βαγονιού διαπιστώνεται ότι επηρεάζεται από: (i) το μήκος του τραίνου καθώς τα πολύ μεγάλα τραίνα (με περισσότερα από 120 βαγόνια) έχουν μεγαλύτερη πιθανότητα ατυχήματος εκτροχιασμού από τα μικρά (έως 40) και τα μεσαία (40-120) (ii) τη θέση που το φορτίο HAZMAT λαμβάνει στην σύνθεση της αμαξοστοιχίας, αφού η αρχή και το τέλος της αμαξοστοιχίας είναι οι πιο επικίνδυνες θέσεις ενώ η 7^η έως 9^η υποδεκάδα οι πιο ασφαλείς (iii) την ταχύτητα των τραίνων η οποία αυξάνει την πιθανότητα εκτροχιασμού (iv) την πιθανότητα αστοχίας της επιδομής η οποία εξαρτάται κυρίως από την ηλικία και φθορά της επιδομής, τα χαρακτηριστικά του τροχαίου υλικού, το πρόγραμμα συντήρησης και το πρόγραμμα επιθεωρήσεων δικτύου δικτύου, τα οποία όλα επηρεάζουν την πιθανότητα εκτροχιασμού.
- 2.** Σε συνέχεια του παραπάνω συμπεράσματος, εύλογα προκύπτει ότι η στρατηγική κατανομή των βαγονιών HAZMAT στην σύνθεση της

αμαξοστοιχίας, καθώς και η επιλογή μικρότερων τραίνων (και συχνότερων δρομολογίων) μπορεί να οδηγήσει στη μείωση της μεταφορικής επικινδυνότητας. Σημειώνεται βέβαια ότι η εφαρμογή οριζοντίως αυτών των μέτρων αναμένεται να αυξήσει το χρόνο παράδοσης και άρα το μεταφορικό κόστος, επομένως κρίνεται αναγκαία η ανάπτυξη και εφαρμογή μεθοδολογιών που να λαμβάνουν υπόψη τη βέλτιστη ισορροπία μεταξύ μεταφορικής επικινδυνότητας και μεταφορικού κόστους. Σε ότι αφορά στον παράγοντα ταχύτητας τραίνων, θα μπορούσε να προταθεί η αναβάθμιση της κλάσης των αμαξοστοιχιών προκειμένου να μπορούν να επιτευχθούν ασφαλέστερα οι μεγαλύτερες ταχύτητες, γεγονός που θα περιορίζει και το μεταφορικό κόστος. Τέλος ο βέλτιστος προγραμματισμός των επιθεωρήσεων της σιδηροδρομικής επιδομής (με έμφαση στα τμήματα που παρουσιάζουν μεγαλύτερη επικινδυνότητα) μπορεί να περιορίσει τα ατυχήματα εκτροχιασμού λόγω βλάβης επιδομής.

3. Ομοίως στην οδική μεταφορά η διαρροή του επικίνδυνου φορτίου συσχετίζεται με την ανατροπή του οχήματος. Αυτό συνεπάγεται ότι προκειμένου να μειωθεί η πιθανότητα διαρροής του ΕΦ, αρκεί η λήψη ενεργειών προκειμένου να μειωθεί η πιθανότητα ανατροπής των βαρέων οχημάτων HAZMAT. Σε ότι αφορά στη πιθανότητα ανατροπής διαπιστώνεται ότι : (i) η επαφή στη πλαϊνή πλευρά του οχήματος αυξάνει τη πιθανότητα ανατροπής (ii)ο έντονος άνεμος αποτελεί το σημαντικότερο καιρικό παράγοντα που αυξάνει την πιθανότητα ανατροπής, επομένως θα μπορούσε να προταθεί η αποφυγή κίνηση των βαρέων οχημάτων HAZMAT υπό αυτές τις καιρικές συνθήκες (iii) η πιθανότητα ανατροπής είναι αυξημένη στα βαρύτερα και γηραιότερα οχήματα, επομένως οι μεταφορείς θα πρέπει να ενθαρρύνονται στην χρήση νέων και ελαφρύτερων οχημάτων ως προς τον τύπο και το αμάξωμα του οχήματος και την ποσότητα του μεταφερόμενου φορτίου. (iv) το μεγαλύτερο ποσοστό ανατροπών προέρχεται από την μη εμπλοκή με άλλο όχημα, αλλά με αντικείμενο (συμπεριλαμβάνοντας στηθαία ασφαλείας και προστατευτικά κιγκλιδώματα)
4. Η σιδηροδρομική μεταφορική επικινδυνότητα επικίνδυνων φορτίων είναι μεγαλύτερη στα δρομολόγια με ενδιάμεσους σταθμούς/κόμβους μεταφόρτωσης, για κάθε σύνθεση τραίνου, από ότι στα non stop δρομολόγια. Αυτό δικαιολογείται από την χρονικά μεγαλύτερη παραμονή των φορτίων εντός των σταθμών και την αύξηση των ενεργειών χειρισμού και ρυμούλκησης των εμπορευμάτων, παράγοντες που αυξάνουν τις πιθανότητες ατυχήματος και διαρροής των επικίνδυνων φορτίων.

- 5.** Επιπλέον η πρόσθετη επικινδυνότητα λόγω συμφόρηση και ουρών αναμονής στους σταθμούς μεταφόρτωσης δεν είναι αμελητέα, αντιθέτως είναι σημαντική ειδικά για τους σταθμούς που βρίσκονται κοντά σε πυκνά πληθυσμιακά κέντρα. Η μείωση της επικινδυνότητας λόγω συμφόρησης μπορεί να επιτευχθεί με μέτρα ενίσχυσης και εκσυγχρονισμού του εξοπλισμού των σταθμών (γερανοί μεταφόρτωσης), τη βελτίωση του χρόνου απόδοσης των γερανών, αλλά και με εφαρμογή της τακτικής «προτεραιότητα των φορτίων HAZMAT». Σημειώνεται ότι η λειτουργική ικανότητα ενός σταθμού μεταφόρτωσης εξαρτάται και από άλλους παράγοντες, όπως η διαμόρφωση των διαδρομών μεταφόρτωσης, καθώς και ο βέλτιστος καθορισμός της θέσης του.
- 6.** Μια ακόμα πρόταση για την μείωση της επικινδυνότητας ενός πυκνού διατροφικού μεταφορικού συστήματος αποτελεί η εφαρμογή διοδίων στις πιο επικίνδυνες διαδρομές, ώστε να προωθείται η χρήση ασφαλέστερων διαδρομών από τους μεταφορείς. Η λύση αυτή μπορεί να είναι πιο αποτελεσματική και πρακτική από ότι η επαναδρομολόγηση (re routing), διότι οι μεταφορείς επιλέγουν την οικονομικότερη διαδρομή. Ως πρόταση προς τις Αρχές περιλαμβάνεται η χρήση των εσόδων των διοδίων στην επάνδρωση νέων σταθμών μεταφόρτωσης.
- 7.** Το μεταφορικό κόστος αποτελεί επίσης σημαντική παράμετρο στο σχεδιασμό ενός μεταφορικού συστήματος καθώς αποτελεί το κρισιμότερο παράγοντα απόφασης για τις ομάδες των αποστολέων και παραληπτών. Το κόστος εξαρτάται από την διαδρομή και το μέσο μεταφοράς. Η συνδυαστική μεταφορά μέσω οδικού και σιδηροδρομικού δικτύου, σταθερά μειώνει το συνολικό μεταφορικό κόστος καθώς και την ανασφάλεια σχετικά με τον χρόνο παράδοσης.
- 8.** Επίσης το μεταφορικό κόστος των επικίνδυνων φορτίων (όπως και των υπολοίπων εμπορευμάτων) επηρεάζεται από τον απρόβλεπτο ανενεργό χρόνο παραμονής τους εντός των εμπορευματικών σταθμών/κόμβων λόγω συμφόρησης και ουρών αναμονής. Η μοντελοποίηση και σύνδεση του χρόνου παραμονής εντός των σταθμών με το μεταφορικό κόστος και η παραγωγή βέλτιστων λύσεων, θέτοντας κατάλληλα όρια επικινδυνότητας για κάθε σταθμό αποτελεί πεδίο έρευνας.

- 9.** Επιπλέον από πληθώρα μελετών αποδεικνύεται ότι η μείωση της επικινδυνότητας κατά τη οδική, σιδηροδρομική και διατροφική μεταφορά επικίνδυνων φορτίων μπορεί να επιτευχθεί με τον σχεδιασμό της μεταφοράς, εννοώντας την επιλογή των βέλτιστων διαδρομών και των συνδυασμών αυτών ανάμεσα σε ζεύγη εκκίνησης –προορισμού, με στόχο την ελαχιστοποίηση της πιθανότητας και των επιπτώσεων ατυχήματος. Επειδή η μεταφορική επικινδυνότητα συγκρούεται με το μεταφορικό κόστος, προκειμένου να επέλθει ισορροπία μεταξύ των δύο αυτών αντικρουόμενων παραμέτρων, ένα σημαντικό τμήμα της έρευνας έχει εστιάσει στην ανάπτυξη μαθηματικών μοντέλων και διπαραγοντικών προγραμμάτων με στόχο τον υπολογισμό των βέλτιστων ζευγών και ισορροπίας (trade-off) μεταξύ επικινδυνότητας- κόστους. Ενδιαφέρον θα παρουσίαζε ο σχεδιασμός ενός δυναμικού μοντέλου υπολογισμού βέλτιστων ζευγών για ένα μεταφορικό σύστημα επιπέδου χώρας που θα λάμβανε υπόψη τις μεταβαλλόμενες ροές των φορτίων, εμπορευματικών και επικίνδυνων.
- 10.** Στην προσπάθεια των ερευνητών να εξελίξουν περαιτέρω την απόδοση του μεταφορικού συστήματος και να αποδώσουν την πραγματική επικινδυνότητα κατά τη μεταφορά HAZMAT, τα τελευταία χρόνια διαπιστώνεται μια τάση να προσεγγίσουν μεγέθη δανεισμένα από άλλες επιστήμες και να τα προσαρμόσουν στον υπολογισμό της επικινδυνότητας. Στόχος είναι η απεικόνιση της μεταβλητότητας της επικινδυνότητας από διάφορες αιτίες, όπως η επιθυμία για ίση και δίκαιη κατανομή επικινδυνότητας (μεγέθη Αξία-σε-Κίνδυνο και Αξία-σε-Κίνδυνο υπό συνθήκη) ή η τυχαία διακοπή (disruption) του δρομολογίου HAZMAT (μέγεθος μεταβλητότητα της επικινδυνότητας -variability in risk) ή μια τρομοκρατική επίθεση (μέγεθος τρωτότητας της επικινδυνότητας – vulnerability on Risk).
- 11.** Σημειώνεται ότι η κοινωνική διακινδύνευση ή το παραδοσιακό ρίσκο που η πλειοψηφία των ερευνών χρησιμοποιούν για να προσδιορίσουν την επικινδυνότητα κατά τη μεταφορά ΕΦ σε όρους αναμενόμενης επίπτωσης, αποτελεί υποεκτίμηση της πραγματικής διακινδύνευσης, αφού ο υπολογισμένος εκτεθειμένος πληθυσμός περιορίζεται από διαφορετικές πιθανότητες. Επομένως η υπολογισμένη πιθανότητα δεν πρέπει να λαμβάνεται υπόψη σε ενέργειες έκτακτης ανάγκης και εκκένωσης χώρων στη περίπτωση ατυχήματος. Αντιθέτως ο εκτεθειμένος πληθυσμός δίνει πιο ρεαλιστικά αποτελέσματα του πραγματικού κινδύνου.

- 12.** Η περίπτωση θεσπισμένου πλαισίου δράσης για τον περιορισμό της μεταφορικής επικινδυνότητας HAZMAT που εφάρμοσαν οι Κάτω Χώρες, παράγει συμπεράσματα που μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε Ευρωπαϊκό επίπεδο. Καταρχήν απαιτεί ιδιαίτερη κυβερνητική προσπάθεια να εφαρμοστούν θέματα ασφάλειας και ταυτόχρονα να προστατευθούν τα συμφέροντα όλων των εμπλεκόμενων ομάδων, σε εθνικό επίπεδο. Επίσης προκύπτουν αβίαστα τα πλεονεκτήματα χρήσης αμιγώς σιδηροδρομικού εμπορευματικού δικτύου, το οποίο ικανοποιεί όλες τις εμπλεκόμενες ομάδες. Τέλος διαπιστώνεται ότι οι πολυτροπικές μεταφορές (χρήση οδικού, θαλάσσιου και παραποτάμιου δικτύου) μπορεί να αποτελέσουν μερική εναλλακτική λύση στο πρόβλημα της αυξημένης ζήτησης στην περίπτωση της Ολλανδίας

6.2 Συμπεράσματα από την εφαρμογή μεθοδολογίας εκτίμησης επικινδυνότητας στο ελληνικό σιδηροδρομικό δίκτυο.

- 1.** Η μεθοδολογία εκτίμησης της επικινδυνότητας που ακολουθήθηκε στην εφαρμογή της περίπτωσης μελέτης του εμπορευματικού δρομολογίου Ε.Σ.Σ Ικονίου –Ε.ΣΣ Διαλογής, αποτελεί προσαρμογή στο σιδηροδρομικό δίκτυο, μιας κλασικής μεθοδολογίας (Saccomanno 1990) που έχει αναπτυχθεί και χρησιμοποιηθεί από πληθώρα ερευνητών τις τελευταίες δεκαετίες. Βασίζεται στον υπολογισμό της παραδοσιακής διακινδύνευσης δηλαδή του εκτεθειμένου σε κίνδυνο πληθυσμού κατά την μεταφορά χλωρίου 180tn, που εκτελείται σε δύο σενάρια, νυχτερινού και πρωινού δρομολογίου. Τα αποτελέσματα της επίλυσης έδειξαν ότι στη περίπτωση του νυχτερινού δρομολογίου η επικινδυνότητα του δρομολογίου είναι ίση με 1,59 άτομα ενώ στην περίπτωση του πρωινού δρομολογίου ίση με 1,23 άτομα, των οποίων η ζωή και η υγεία κινδυνεύουν από την έκθεση σε τοξικό αέριο. Τα αποτελέσματα αυτά είναι αρκετά υψηλά, εξαιτίας των μεγάλων ζωνών επιρροής αλλά και της διέλευσης της αμαξοστοιχίας από τα πιο πυκνοκατοικημένα κέντρα της χώρας, συμπεριλαμβανομένων των τριών μεγαλύτερων πόλεων της (Αθήνα, Θεσσαλονίκη, Λάρισα).
- 2.** Η μεταφορική επικινδυνότητα του υπό μελέτη δρομολογίου, εκτός των μεγεθών πιθανότητας ατυχήματος με διαρροή ΕΦ και επίπτωσης σε εκτιθέμενο πληθυσμό, από τα οποία εξ ορισμού εξαρτάται, επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό από τις ατμοσφαιρικές συνθήκες οι οποίες σαν παραδοχή

εισάγονται στο Γκαουσιανό μοντέλο επίλυσης. Συγκεκριμένα από μια σειρά προσομοιώσεων διασποράς αεροσωματιδίων χλωρίου που επιλύθηκαν μέσω του λογισμικού ALOHA, διαπιστώθηκε ότι η νέφωση, η ηλιακή ακτινοβολία, η υγρασία και η θερμοκρασία που καθορίζουν την κατηγορία ατμοσφαιρικής αστάθειας, σε συνδυασμό με την ταχύτητα του ανέμου μπορούν να μεταβάλλουν σε μεγάλο βαθμό την υπολογισμένη περιοχή επιρροής της περίπτωσης μελέτης μας.

- 3.** Συγκεκριμένα (i) για σταθερές συνθήκες τοποθεσίας και ώρας ατυχήματος, ποσότητας και κλάσης ουσίας που διαρρέει, τύπου βυτίου, μεγέθους και θέσης οπής και ρυθμού διαρροής, η μεταβολή της ατμοσφαιρικής τάξης επιφέρει πολύ μεγάλες μεταβολές στην υπολογιζόμενη απειλούμενη ζώνη από 2,6km έως >10km. (ii) Η εξέλιξη της διασποράς αερίου κατά τη διάρκεια της νύχτας, δηλαδή απουσία ηλιακής ακτινοβολίας επιφέρει σχετικά σταθερές ατμοσφαιρικές συνθήκες γεγονός που συνεπάγεται μεγαλύτερες απειλούμενες ζώνες σε σχέση με αντίστοιχες πρωινές ατμοσφαιρικές συνθήκες. (iii) για σταθερό επίπεδο νέφωσης όσο αυξάνεται η ταχύτητα του ανέμου, μειώνεται η απειλούμενη ζώνη. Αυτό παρατηρείται και για τα τρία επίπεδα νέφωσης.
- 4.** Τελικά επιλέγοντας σχετικά δυσμενέστερες ατμοσφαιρικές συνθήκες δηλ. πυκνής νέφωσης, υγρασίας πάνω από 50% και χαμηλής ταχύτητας ανέμου 2,5m/sec διαπιστώθηκε ότι (i) για το πρωινό δρομολόγιο η κατηγορία ατμοσφαιρικής αστάθειας είναι ουδέτερη (κατηγορία C) και η απειλούμενη περιοχή υπολογίστηκε ίση με 5,2Km (ii) για το νυχτερινό δρομολόγιο, εξαιτίας της μη ύπαρξης ηλιακής ακτινοβολίας και της νυχτερινής πύκνωσης της ατμόσφαιρας για σταθερές τις υπόλοιπες συνθήκες, η κατηγορία της ατμοσφαιρικής σταθερότητας έγινε D. Το αποτέλεσμα είναι η απειλούμενη περιοχή να αυξηθεί σε 8,1Km.
- 5.** Για τον υπολογισμό του εκτεθειμένου πληθυσμού με ακρίβεια, είναι αναγκαία η πληροφορία της χωρικής κατανομής του πληθυσμού ως βάση δεδομένων σε σύστημα GIS προκειμένου να υπολογίζεται επακριβώς στα όρια των ζωνών επιρροής ο πληθυσμός που διαμένει και άρα κινδυνεύει. Στην παρούσα περίπτωση μελέτης, δεδομένης της μη διάθεσης χωρικής κατανομής του πληθυσμού, ο υπολογισμός του εκτεθειμένου πληθυσμού έγινε ανά επίπεδο περιφερειακών ενότητων, λαμβάνοντας όμως υπόψη την πυκνότητα πληθυσμού ανά δημοτική ενότητα των πρωτευουσών των νομών. Ιδιαίτερα σημειώνεται ότι για τον νομό Αττικής που είναι ο

πολυπληθέστερος που η αμαξοστοιχία διέρχεται, λαμβάνονται υπόψη οι επτά περιφερειακές ενότητες της, ενώ για την ΠΕ Θεσσαλονίκης λήφθηκαν υπόψη οι πυκνότητες πληθυσμού τεσσάρων διαφορετικών δημοτικών ενοτήτων. Παρόλ' αυτά ο υπολογιζόμενος εκτεθειμένος πληθυσμός δεν αντιπροσωπεύει τον πραγματικό πληθυσμό υπό κίνδυνο σε περίπτωση ατυχήματος.

- 6.** Άλλωστε τα αποτελέσματα της επικινδυνότητας σε όρους αναμενόμενης επίπτωσης, όπως έχει ήδη σημειωθεί δεν πρέπει να συγχέονται με τον υπολογισμό του πραγματικού αριθμού ανθρώπων που κινδυνεύουν στην περίπτωση ατυχήματος. Αυτό οφείλεται στη φύση του επιμετρούμενου μεγέθους που υποεκτιμά τον πραγματικό εκτιθέμενο πληθυσμό πολλαπλασιάζοντάς το με την πιθανότητα ατυχήματος. Επομένως η επικινδυνότητα που υπολογίζεται μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνο ενδεικτικά ή συγκριτικά για διαφορετικές περιπτώσεις μελέτης. Για τους λόγους αυτούς κατά την κρίση της συγγραφέα θεωρείται αποδεκτός ο προσδιορισμός της πυκνότητας πληθυσμού σε επίπεδο περιφερειακών ενοτήτων, δεδομένης της συγκριτικής και μόνο χρήσης των αποτελεσμάτων επικινδυνότητας.
- 7.** Ιδιαίτερο ενδιαφέρον θα παρουσίαζε η εκτίμηση της επικινδυνότητας όλων των εμπορευματικών δρομολογίων που εκτελούνται στο ελληνικό σιδηροδρομικό δίκτυο, ενσωματώνοντας τα δεδομένα ατυχημάτων, δρομολογίων και αμαξοστοιχιών όλων των εταιρειών εμπορευματικής μεταφοράς που δραστηριοποιούνται στην επικράτεια. Επίσης πεδίο έρευνας θα αποτελούσε η εκτίμηση της επικινδυνότητας στην περίπτωση μεγαλύτερης ζήτησης μεταφοράς φορτίων και δικτύου σύμφωνα με τις προβλέψεις του Εθνικού Στρατηγικού Σχεδίου Μεταφορών 2037.-

7. Βιβλιογραφία

- [1] National Advisory Committee & USEPA, 2001. *epa.gov*. [Ηλεκτρονικό]
Available at: <https://www.epa.gov/aegl>
[Πρόσβαση 5 2 2020].
- [2] Railway Supply Institute, 2017. *tank car resource center*. [Ηλεκτρονικό]
Available at: <https://tankcarresourcecenter.com/tankcar101/>.
[Πρόσβαση 5 2 2020].
- [3] AAR, 2018. *aar.org*. [Ηλεκτρονικό]
Available at: <https://www.aar.org/wp-content/uploads/2018/07/AAR-Rail-Intermodal.pdf>
[Πρόσβαση 5 2 2020].
- [4] Abkowitz, M., Lepofsky, M. & P.Cheng, 1992. Selecting Criteria for Designating Hazardous Materials Highway Routes. *Transportation Research*, Τόμος 1333, pp. 30-35.
- [5] ACUTEX, 2006. *jrc.ec.europa.eu*. [Ηλεκτρονικό]
Available at:
<https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC32879>
[Πρόσβαση 5 2 2020].
- [6] Aerde, M. V., Stewart, A. & Saccomanno, F., 1988. Estimating the impacts of LPG spills during transportation accidents. *Journal of Hazardous Materials*, Τόμος 20, pp. 375-392.
- [7] AIHA, 2020. *aiha.org*. [Ηλεκτρονικό]
Available at: <https://www.aiha.org/get-involved/aiha-guideline-foundation/erpgs>
[Πρόσβαση 5 2 2020].
- [8] American Institute of Chemical Engineers, 1995. *Guidelines for chemical transportation risk analysis*, s.l.: s.n.
- [9] American Institute of Chemical Engineers, 1998. *Guidelines for evaluating the characteristics of vapor cloud explosions, flash fires and BLEVEs*, s.l.: s.n.
- [10] American Institute of Chemicals Engineers, 1999. *Guidelines for Consequence Analysis of Chemicals Releases*, s.l.: s.n.
- [11] American Institute of Chemicals Engineers, 2000. *Guidelines for chemical process quantitative risk analysis*, s.l.: s.n.

- [12] Androutsopoulos, K. & Zografos, K., 2010. Solving the bicriterion routing and scheduling problem for hazardous materials distribution. *Transportation Research Part C*, Τόμος 18, pp. 713-726.
- [13] Artzner, P., F.Delbaen, J.Eber & Heath, D., 1999. Coherent measures of risk. *Mathematical Finance*, 9(3), pp. 203-228.
- [14] Arya, S. P., 1999. *Air pollution meteorology and dispersion*. Cambridge: Oxford University Press.
- [15] Assadipour, G., Ke, G. Y. & Verma, M., 2015. Planning and managing intermodal transportation of hazardous materials with capacity selection and congestion. *Transportation Research Part E*, Τόμος 76, pp. 45-57.
- [16] Assadipour, G., Ke, G. Y. & Verma, M., 2016. A toll-based bi-level programming approach to managing hazardous materials shipments over an intermodal transportation network. *Transportation Research part D*, Τόμος 47, pp. 208-221.
- [17] B.Y.Kara & Verter, V., 2004. Designing a road network for hazardous materials transportation. *Transportation Science*, 38(2), pp. 188-196.
- [18] Bagheri, M., Saccomanno, F., Chenouri, S. & L.P.Fu, 2012. Modeling hazardous materials risks for different train make-up plans. *Transportation Research part E Logistics Transportation*, Τόμος 48, pp. 907-918.
- [19] Bagheri, M., Saccomanno, F., S.Chenouri & Fu, L., 2011. Reducing the threat of in transit derailments involving dangerous goods through effective placement along the train consist. *Accident Analysis and Prevention*, 43(3), pp. 613-620.
- [20] Bagueri, M., Verma, M. & Verter, V., 2014. Transport mode selection for toxic gases: rail or road. *Risk Analysis*, 34(1), pp. 168-186.
- [21] Barkan, C. P., Dick, C. T. & Anderson, R., 2003. Railroad derailments factors affecting hazardous materials transportation risk. *Transportation Research Record*, Τόμος 1825, pp. 64-74.
- [22] Barkan, C., Treichel, T. & G.Widell, 2000. Reducing hazardous materials releases from railroad tank car safety vents. *Transportation Research Record*, Τόμος 1707, pp. 27-34.

- [23] Batta, R. & Chiu, S., 1988. Optimal Obnoxious Paths on a Network: Transportation of Hazardous Materials. *Operations Research*, Τόμος 36, pp. 84-92.
- [24] BBC News, 2019. *BBC.com*. [Ηλεκτρονικό]
Available at: <https://www.bbc.com/news/world-asia-40485671>
[Πρόσβαση 5 2 2020].
- [25] Beard, A. & Carvel, R., 2005. *The handbook of tunnel fire safety*. s.l.:s.n.
- [26] Bianco, L., Caramia, M. & Giordani, S., 2009. A bi level flow model for hazmat transportation network design. *Transportation Research Part C Emergency Technology*, 17(2), pp. 175-196.
- [27] Bianco, L., Ceramia, M., Giordani, S. & Piccialli, V., 2016. A game theoretic approach for regulating hazmat transportation. *Transportation Science*, 50(2), pp. 424-438.
- [28] Bubbico, R. και συν., 2006. Risk management of road and rail transport of hazardous materials in Sicily. *Loss Prevention Process Industries*, Τόμος 19, pp. 32-38.
- [29] Button, N. P. & Reilly, P., 2000. Uncertainty in incident rates for trucks carrying dangerous goods. *Accident Analysis and Prevention*, Τόμος 32, pp. 797-804.
- [30] Committee for the prevention of disasters, 1997. *Methods for the calculation of physical effects due to releases of hazardous materials*. 3 επιμ. s.l.:Yellow Book TNO.
- [31] Considine, G., 1984. *The model of heat radiation from hydrocarbon flames*. s.l.:SDR R297.
- [32] Covello, V. & Merkhofer, M., 1993. *Risk Assessments methods: approaches for assessing health and enviromental risks*. New York: Plenum Publishing Corporation.
- [33] Dadkar, Y., Nozick, L. & Jones, D., 2010. Optimizing facility use restrictions for the movement of hazardous materials. *Transportation Research Part B: Methologies*, Τόμος 44, pp. 267-281.
- [34] DG Mobility and Transport of the European Commission & European Union Agency for Railways, 2018. *Risk management framework foe inland transport og dangerous goods-Framework Guide*. [Ηλεκτρονικό]

- Available at:
https://www.era.europa.eu/sites/default/files/activities/docs/framework_guide_overview.pdf
[Πρόσβαση 5 2 2020].
- [35] Ditta, A., O.Figueroa, G.Galindo & R.Yie-Pinedo, 2018. A review on research in transportation of hazardous materials. *Socio-Economic Planning Sciences*.
- [36] ECETOC, 1991. *ecetoc.org*. [Ηλεκτρονικό]
Available at: <http://www.ecetoc.org/wp-content/uploads/2014/08/ECETOC-TR-043.pdf>
[Πρόσβαση 5 2 2020].
- [37] ERG, 2008. *North American Emergency Responce Guidebook*. [Ηλεκτρονικό]
Available at: <https://www.phmsa.dot.gov/hazmat/erg/emergency-response-guidebook-erg>
[Πρόσβαση 16 2 2020].
- [38] Erkut, E. & Gzara, F., 2008. Solving the hazmat transport network design problem. *Computers & Operatios Research*, 35(7), pp. 2234-2247.
- [39] Erkut, E. & V.Verter, 1995a. *Hazardous Materials Logistics in Facility Location: A survey of Applications and Methods*. New York: Springer-Verlag.
- [40] Erkut, E. & V.Verter, 1995b. A framework for hazardous materials trasport risk assessment. *Risk Analysis*, Τόμος 15, pp. 589-601.
- [41] Erkut, E. & Verter, V., 1998. Modeling of transport risk for hazardous materials. *Operations Research*, 46(5), pp. 625-642.
- [42] Esfandeh, T., Kwon, C. & Batta, R., 2016. Regulating hazardous materials transportation by dual toll pricing. *Transportation Research Part B*, Τόμος 83, pp. 20-35.
- [43] Eurostat, 2019. *Annual number of accidents involving the transport of dangerous goods 2004-2015*. [Ηλεκτρονικό]
Available at:
<https://data.europa.eu/euodp/data/dataset/PzYObhs9XiXh9KuNw4l4nw>
[Πρόσβαση 16 20 2019].
- [44] Eurostat, 2019. *Eurostat Annual road freight transport of dangerous goods, by type of dangerous goods and broken down by*

- activity*. [Ηλεκτρονικό]
Available at:
https://appsso.eurostat.ec.europa.eu/nui/show.do?dataset=road_go_ta_dg&lang=en
[Πρόσβαση 15 10 2019].
- [45] Eurostat, 2019. *Transport of dangerous goods [rail_go_dnggood]*. [Ηλεκτρονικό]
Available at:
http://appsso.eurostat.ec.europa.eu/nui/show.do?wai=true&dataset=rail_go_dnggood
[Πρόσβαση 16 10 2019].
- [46] Fang, K., Ke, G. Y. & Verma, M., 2017. A routing and scheduling approach to rail transportation of hazardous materials with demand due dates. *European Journal of Operational Research*, Τόμος 261, pp. 154-168.
- [47] FRA, 2020. *railroads.dot.gov*. [Ηλεκτρονικό]
Available at: <https://railroads.dot.gov/railroad-safety/accident-data-reporting-and-investigations>
[Πρόσβαση 5 2 2020].
- [48] Harwood, D. W., Viner, J. G. & Russell, E. R., 1993. Procedure for developing truck accident and release rates for hazmat routing. *Journal of Transportation Engineering*, Τόμος 119, pp. 189-199.
- [49] Hosseini, S. D. & Verma, M., 2017. A Value-at-Risk (VaR) approach to routing rail hazmat. *transportation Research*, Τόμος 54, pp. 191-211.
- [50] Hosseini, S. D. & Verma, M., 2018. Conditional Value -at -Risk (CVaR) methodology to optimal train configuration and routing of rail hazmat shipments. *Transportation Research*, Τόμος 110, pp. 79-103.
- [51] HSE, 2017. *hse.gov.uk*. [Ηλεκτρονικό]
Available at: <https://www.hse.gov.uk/chemicals/haztox.htm>
[Πρόσβαση 15 2 2020].
- [52] IATA, 2020. *DGR*. [Ηλεκτρονικό]
Available at: <https://www.iata.org/en/publications/dgr/>
[Πρόσβαση 5 2 2020].
- [53] ICAO, 2018. *Technical Instructions for the Safe Transport of Dangerous Goods by Air*. [Ηλεκτρονικό]

- Available at: <https://www.icao.int/safety/DangerousGoods/Pages/technical-instructions.aspx>
[Πρόσβαση 5 2 2020].
- [54] IMO, 2018. *IMDG Code*. [Ηλεκτρονικό]
Available at: <http://www.imo.org/en/Publications/IMDGCode/Pages/Default.aspx>
[Πρόσβαση 5 2 2020].
- [55] INERIS, INRS & IPSN, n.d. *ineris.fr*. [Ηλεκτρονικό]
Available at: <http://www.ineris.fr/>
[Πρόσβαση 5 2 2020].
- [56] Iranitalab, A. & A.Khattak, 2019b . Prediction of hazardous materials release in train incidents and cargo tank truck crashes. *TRB Annual Meeting*, Issue 19-03821.
- [57] Iranitalab, A. & Khattak, A., 2019a. Rollover and hazardous materials release statistical models for cargo tank trucks' crashes. *TRB 2019 Annual Meeting*, Τόμος paper 19-00847.
- [58] J.Cheng, M.Verma & Verter, V., 2017. Impact of train makeup on hazmat risk in a transport corridor. *Journal of Transportation Safety*, Τόμος 2, pp. 167-194.
- [59] Jabbarzadeh, A., Azad, N. & Verma, M., 2019. An optimization approach to planning rail hazmat shipments in the presence of random disruptions. *Omega*, pp. 1-38.
- [60] Jiang, Y., Zhang, X., Rong, Y. & Zhang, Z., 2014. A multimodal location and routing model for hazardous materials transportation based on multi-commodity flow model. *Science Direct*, Τόμος 138, pp. 791-799.
- [61] JRC, 2017. *jrc.ec.europa.eu*. [Ηλεκτρονικό]
Available at: <https://adam.jrc.ec.europa.eu/en/adam/content>
[Πρόσβαση 5 2 2020].
- [62] Kang, Y., Batta, R. & Kwon, C., 2014a. Value at Risk model for hazardous materials transportation. *Annals of Operations research*, 38(2), pp. 361-387.
- [63] Kang, Y., Batta, R. & Kwon, C., 2014b. Generalized route planning model for hazardous material transportation with VaR and equity considerations. *Computers and Operation Research*, Τόμος 43, pp. 237-247.

- [64] Kazantzi, V., Kazantzis, N. & Gerogiannis, V., 2011. Risk informed optimization of a hazardous material multi-periodic transportation model. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, Τόμος 24, pp. 767-773.
- [65] Khanmohamedi, M., Bagheri, M., Khademi, N. & Ghannadpour, S., 2018. A security vulnerability analysis model for dangerous goods transportation by rail-Case study: Chlorine transportation in Texas-Illinois. *Safety Science*, Τόμος 110, pp. 230-241.
- [66] Lacroix, D., Cassini, P., Hall, R. & Saccomanno, F., 1999. *Transport of DG through Road Tunnels: An integrated QRA model developed under the joint*. Oslo, "International ESReDA Seminar", OECD/Piarc projects ERS2.
- [67] Lees, F. P., 1996. *Loss Prevention in the process industries: Hazard identification assessment and control*. s.l.:s.n.
- [68] Lees, F. P., 2012. *Loss prevention in the process industries*. Sam Mannan επιμ. <https://doi.org/10.1016/C2009-0-24104-3>: Butterworth-Heinemann.
- [69] Liu, X., 2017. Optimizing rail defect inspection frequency to reduce the risk of hazardous materials transportation by rail. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, Τόμος 48, pp. 151-161.
- [70] Liu, X. και συν., 2014. Optimization of rail defect inspection frequency for the improvement of railway transportation safety and efficiency. *Journal of Transportation Engineering*, p. 140(10).
- [71] M.Verma & Verter, V., 2010. A lead-time approach to planning rail-truck intermodal transportation of dangerous goods. *European Journal of Operational Research*, Τόμος 202, pp. 696-706.
- [72] Marcotte, P., Mercier, A., Savard, G. & Vereter, V., 2009. Toll policies for mitigating hazardous materials transport risk. *Transportation Science*, 43(2), pp. 228-243.
- [73] Mavrotas, G. & Florios, K., 2013. An improved version of the augmented E-constraint method for finding the exact pareto set in multi-objective integer programming problems. *Applied Math Computation*, Τόμος 219, pp. 9652-9669.

- [74] Ma, X., Xing, Y. & Lu, J., 2019. Causation analysis of hazardous material road transportation accident by Bayesian network using Genie. *TRB Annual Meeting*, Issue paper 19-01726.
- [75] Mazzarotta, B., 2002. Risk reduction when transporting dangerous goods: road or rail?. *Risk Decision Policy*, Τόμος 7, pp. 45-56.
- [76] McKnight, A. J. & Bahoulth, G. T., 2009. Analysis of Large Truck Rollover Crashes. *Traffic Injury prevention*, 10(5), pp. 421-426.
- [77] Mohammadi, M., Jula, P. & Tavakkoli-Moghaddam, R., 2017. Design of a reliable multi-modal multi- commodity model for hazardous materials transportation under uncertainty. *European Journal of Operational Research*, Τόμος 257, pp. 792-809.
- [78] Moore, D., B.Fuller, Hazzan, M. & Jones, J., 2007. Development of a security vulnerability assessment process for the RAMCAP chemical sector. *Hazardous Materials*, Τόμος 142, pp. 689-694.
- [79] Nathanail, E., 2008. Routing of dangerous goods through the implementation of a risk assessment methodology. *Transition Studies Review*, , Issue 48.
- [80] Nathanail, E., Zacharis, S., Vagiokas, N. & Prevedouros, P., 2010. Risk Assessment for the Transportation of Hazardous Materials Through Tunnels. *Transportation Research Record*, Issue 2162, p. 98 – 106..
- [81] Nielsen, L., Kroon, L. & Maroti, G., 2012. A rolling horizon approach for disruption management of railway rolling stock. *European Journal of Operational Research*, Τόμος 220, pp. 496-509.
- [82] NIOSH, 1994. *cdc.org*. [Ηλεκτρονικό]
Available at: <https://www.cdc.gov/niosh/idlh/>
[Πρόσβαση 5 2 2020].
- [83] Noren, A. & Winer, J., 2002. *Modelling crowd evacuation from road and tran tunnels- data and design for faster evacuations*. Sweden: Department of fire safety engineering, Lund University.
- [84] OTIF, 2019. *OTIF.org*. [Ηλεκτρονικό]
Available at: <https://otif.org/fileadmin/>
[Πρόσβαση 5 2 2020].
- [85] Oxychem, 2012. *oxy.com*. [Ηλεκτρονικό]
Available at:
<https://www.oxy.com/OurBusinesses/Chemicals/Products/Documents/Chl>

[orine/Chlorhb1.pdf](#)

[Πρόσβαση 5 2 2020].

- [86] Palsson, G. I., 2004. *Risk management in Hvalfjorthur tunnel*. Sweden: Departement of fire safety engineering, Lund University.
- [87] Papazoglou, I. A. & Aneziris, O. N., 1999. Uncertainty quantification in the health consequences of the boiling liquid expanding vapor explosion phenomenon. *Journal of Hazardous Materials*, Τόμος A67, pp. 217-235.
- [88] Pasquill, F. & Smith, F. B., 1983. *Atmospheric Diffusion*. Chichester, UK: Ellis Horwood.
- [89] Persson, M., 2002. *Quantitative risk analysis procedure for the fire evacuation of a road tunnel*. Sweden: Departement of fire safety engineering, Lund University.
- [90] Poku-Boansi, M., Tornyeviadzi, P. & Adarkwa, K., 2018. Next to suffer: population exposure risk to hazardous material transportation in Ghana. *Journal of Transport & Health*, Τόμος 10, pp. 203-212.
- [91] Raj, P. & Pritchard, E., 2000. Hazardous materials transportation on US railroads. *Transportation Research Record*, Τόμος 1707, pp. 22-26.
- [92] Revelle, C., Cohon, J. & Shobrys, D., 1991. Simultaneous Siting and Routing in the Disposal of Hazardous Wastes. *Transportation Research*, Τόμος 25, pp. 138-145.
- [93] RFI News, 2019. *RFI France*. [Ηλεκτρονικό]
Available at: <http://www.rfi.fr/fr/afrique/20190506-niger-explosion-camion-citerne-fait-moins-58-morts-niamey>
[Πρόσβαση 10 2 2020].
- [94] RIVM, 1999. *rivm.nl*. [Ηλεκτρονικό]
Available at: <https://www.rivm.nl/en>
[Πρόσβαση 5 2 2020].
- [95] Saccomanno, F. & Chan, A., 1985. Economic Evaluation of Routing Strategies for Hazardous Road Shipments. *Transportation Research*, Τόμος 1020, pp. 12-18.
- [96] Saccomanno, F., Shortreed, J., Aerde, M. & Higgs, J., 1990. Comparison of risk measures for the transport of dangerous commodities by truck and rail. *Transportation Research*, Τόμος 1245, pp. 1-13.

- [97] SCAPA, n.d. [Ηλεκτρονικό]
Available at: <https://response.restoration.noaa.gov/oil-and-chemical-spills/chemical-spills/resources/temporary-emergency-exposure-limits-teels.html>
[Πρόσβαση 5 2 2020].
- [98] Shen, X. και συν., 2014. Analysis on tank truck accidents involved in road hazardous materials transportation in China. *Traffic Injury Prevention*, 15(7), pp. 762-768.
- [99] The Institution of Chemical Engineers, 1989. *Calculations of the intensity of thermal radiation from large fires*, s.l.: First report of the major hazards assessment panel-thermal radiation working group.
- [100] The Netherlands organization of applied scientific research, 1998. Methods for the calculation of physical effects. *TNO*, p. CPR14E.
- [101] Thompson, R., E.R.Zamejc & Ahlbeck, D., 1992. *Hazardous materials car placement in a train consist*, Report DOT/FRA/ORD-92/18.1: US Departement of Transportation.
- [102] Toumazis, I., Kwon, C. & Batta, R., 2013. Value at Risk and Conditional Value at Risk minimization for hazardus material routing. Στο: R. Batta & C. Kwon, επιμ. *Handbook of OR/MS Models in Hazardous Materials Transportation*. New York: Springel, pp. 127-153.
- [103] UNECE & CCNR, 2008. *AND*. [Ηλεκτρονικό]
Available at: <https://www.unece.org/fileadmin>
[Πρόσβαση 5 2 2019].
- [104] UNECE & IRU, 2019. ADR. Στο: *Εισαγωγή-Γενικά*. s.l.:ECE/TRANS/275/vol1, p. v.
- [105] UNECE, 2019. *UNECE press releases*. [Ηλεκτρονικό]
Available at: <https://www.unece.org/?id=51735>,
[Πρόσβαση 5 2 2020].
- [106] UNECE, 2019. *UNECE.org*. [Ηλεκτρονικό]
Available at: <https://www.unece.org/trans/danger/publi/adr/adr2019/19contentse.html>
[Πρόσβαση 5 2 2020].
- [107] US Census Bureau, 2018. *Commodity Flow Survey*. [Ηλεκτρονικό]
Available at: <https://www.bts.gov/surveys/commodity-flow-survey/2017->

cfs-preliminary-data)

[Πρόσβαση 10 10 2019].

- [108] Verma, M., 2011. Railroad transportation of dangerous goods: A conditional exposure approach to minimize transport risk. *Transportation Research*, Τόμος 19, pp. 790-802.
- [109] Verma, M., 2012. A fixed-penalty cost and expected consequence approach to planning and managing intermodal transportation of heterogeneous freight. *AIMS International Journal of Management*, 6(2), pp. 101-118.
- [110] Verma, M. & Verter, V., 2007. Railroad transportation of dangerous goods: Population exposure to airborne toxins. *ScienceDirect*, Τόμος 34, pp. 1287-1303.
- [111] Verma, M. & Verter, V., 2008. The trade-offs in rail truck intermodal transportation of hazardous materials: an illustrative case study. Στο: C. Bersani, A. Boulmakoul, E. Garbolino & R. Sacile, επιμ. *Advanced technologies and Methologies for Risk Management in the Global Transport of Dangerous Goods: NATO Science for Peace and Security Series*. s.l.:IOS Press, pp. 148-168.
- [112] Verma, M., Verter, V. & Zufferey, N., 2012. A bi-objective model for planning and managing rail-truck intermodal transportation of HAZMAT. *Transportation Research Part E*, Τόμος 48, pp. 132-149.
- [113] Vlies, V. V. d., Berrevoets, M. & D.Tretjakova, 2018. Back on track:Creating a robust institutional framework for rail transport of hazardous substances in the Netherlands. *Safety Science*, Τόμος 110, pp. 242-252.
- [114] Wang, J., Kang, Y., Kwon, C. & Batta, R., 2012. Dual toll pricing for hazardous materials transport with linear delay. *Network and Spatial Economics*, 12(1), pp. 147-165.
- [115] wikipedia.org, 2020. *en.wikipedia.org*. [Ηλεκτρονικό]
Available at:
https://en.wikipedia.org/wiki/Atmospheric_dispersion_modeling
[Πρόσβαση 5 2 2020].
- [116] Xie, Y., Lu, W., Wang, W. & Quadrifoglio, L., 2012. A multimodal location and routing model for hazardous materials transportation. *Journal of Hazardous Materials*, Τόμος 227, pp. 135-141.

[117] ΕΛΣΤΑΤ, 2011. *www.statistics.gr*. [Ηλεκτρονικό]

Available at:

https://www.statistics.gr/el/statistics?p_p_id=documents_WAR_publicationsportlet_INSTANCE_qDQ8fBKko4IN&p_p_lifecycle=2&p_p_state=normal&p_p_mode=view&p_p_cacheability=cacheLevelPage&p_p_col_id=column-2&p_p_col_count=4&p_p_col_pos=1&documents_WAR_publicationsportlet_INSTANCE_qDQ8fBKko4IN&p_p_lifecycle=2&p_p_state=normal&p_p_mode=view&p_p_cacheability=cacheLevelPage&p_p_col_id=column-2&p_p_col_count=4&p_p_col_pos=1 [Πρόσβαση 5 2 2020].

